



**TUGAS AKHIR - TL141584**

**OPTIMASI DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PROTEKSI  
KATODIK ANODA KORBAN PADA *WATER INJECTION*  
*PIPELINE* PERTAMINA - PETROCHINA EAST JAVA TUBAN  
*PLANT***

Mustika Dwi Erlinda  
NRP. 2713 100 056

Dosen Pembimbing :  
Budi Agung Kurniawan ST., M.Sc.  
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL141584**

**DESIGN OPTIMIZATION AND SIMULATION OF SACRIFICIAL  
ANODE CATHODIC PROTECTION SYSTEM ON WATER  
INJECTION PIPELINE PERTAMINA -PETROCHINA EAST  
JAVA TUBAN PLANT**

Mustika Dwi Erlinda  
NRP. 2713 100 056

Advisor :

Budi Agung Kurniawan, ST., M.Sc.

Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**OPTIMASI DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PROTEKSI  
KATODIK ANODA KORBAN PADA *WATER INJECTION*  
*PIPELINE* PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA  
TUBAN PLANT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Analisa Kegagalan dan Pengendalian Korosi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Mustika Dwi Erlinda**  
NRP. 2713 100 056

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- 1 Budi Agung Kurniawan S.T., M..Sc..... (Pembimbing I)  
2. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.P., PhD ..... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**OPTIMASI DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PROTEKSI  
KATODIK ANODA KORBAN PADA *WATER INJECTION*  
*PIPELINE* PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA  
TUBAN PLANT**

**Nama** : Mustika Dwi Erlinda  
**NRP** : 2713100056  
**Jurusan** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  
Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D

**Abstrak**

Sistem proteksi katodik anoda korban adalah salah satu metode pengendalian korosi dengan menghubungkan struktur yang diproteksi dengan logam lain yang lebih aktif, sehingga struktur menjadi terproteksi sedangkan logam lain terkorosi. Sistem tersebut diterapkan pada saluran *Water Injection Pipeline* milik Pertamina-Petrochina East Java Tuban Plant. Saluran *Water Injection Pipeline* yang dianalisis pada penelitian ini memiliki panjang 2605.8 m yang berada di bawah permukaan tanah. Pemilihan sistem proteksi katodik anoda korban disesuaikan dengan kebutuhan arus proteksi pada pipa. Desain awal mengatakan bahwa dibutuhkan 10 buah anoda dengan waktu desain 20 tahun. Namun, di lapangan ditemukan telah terjadi beberapa kali kebocoran pada *Water Injection Pipeline* pada bagian *riser* tepat di bawah permukaan tanah dengan indikasi menurunnya tegangan proteksi di bawah standard NACE SP 0169 (-850 mV s.d. -1050mV) terutama di area pad C. Setelah dilakukan rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban didapatkan hasil bahwa untuk area CPA dibutuhkan 4 buah (*17 lb high Magnesium anode*) untuk mensuplai kebutuhan arus sebesar 0.167 Ampere. Sedangkan untuk area sawah

dibutuhkan 7 buah ( *32lb high magnesium anode*) untuk menyuplai arus proteksi sebesar 0.5989 Ampere. Kemudian pada pad C dibutuhkan 2 (*32lb high magnesium anode*) untuk menyuplai kebutuhan arus sebesar 0.101 Ampere. Hasil rancang ulang yang telah dilakukan disimulasikan menggunakan software ANSYS APDL 15.0 dalam bentuk 2D untuk menilai kelayakan dari desain proteksi katodik. Simulasi dilakukan berbasis *steady state thermal electric*. Acuan yang dijadikan standar adalah minimal nilai proteksi yang harus dipenuhi pada desain SACP 2D yaitu  $3.3 \times 10^{-4}$  Ampere. Dari empat variable potensial proteksi yang disimulasikan didapatkan hasil bahwa kriteria arus proteksi minimal dapat tercapai saat potensial proteksi sebesar -882 mV, -950 mV, -1094 mV. Sedangkan pada potensial proteksi -785 mV terdapat area di sekitar pipa yang nilai arus proteksinya kurang dari kriteria yang ditetapkan. Hal ini sesuai dengan standar NACE SP 0169 sehingga desain proteksi katodik yang telah dirancang dapat diterima.

**Kata kunci :** *ANSYS thermal electric analysis, NACE SP 0169, Proteksi Katodik Anoda Korban, Water Injection Pipeline*



***Design Optimization and Simulation of Sacrificial Anode  
Cathodic Protection System on Water Injection Pipeline  
Pertamina –Petrocina East Java Tuban Plant***

***Name*** : Mustika Dwi Erlinda  
***SRN*** : 2713 100 056  
***Major*** : ***Materials and Metallurgical Engineering***  
***Advisor*** : ***Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.***  
***Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., PhD***

***Abstract***

*Sacrificial anode cathodic protection system is one method of corrosion control. The mechanism is to connect the structure to be protected with other metals that are more active, so that the structure become protected and other metals corroded. Water Injection Pipeline analyzed here is underground pipeline which has a length of 2605.8 m. Selection of sacrificial anode cathodic protection system tailored to the needs of current protection on the pipe. The initial design say that it takes 10 pieces of anode with 20 years of design time. However, leakage has been occurred several times in the Water Injection Pipeline, specifically on the buried riser at pad C. After re-design sacrificial anode cathodic protection system result showed that the CPA needed 4 pieces (17 lb high magnesium anode) to supply a current of 0167 Amperes. As for the farm area needed 7 pieces (32lb high magnesium anode) to supply current at 0.5989 Ampere. Then pad C took 2 (32lb high magnesium anode) to supply a current of 0101 Ampere. The result of redesign next simulated using ANSYS APDL 15.0 in 2D to assess the feasibility of the design of cathodic protection. The simulation was performed based Electric thermal steady state. The reference standard used is the minimum value of the protection that must be met of  $3.3 \times 10^{-4}$  Ampere. Four protective potential variables simulated showed that current protection can be achieved when the protective potential reached -882 mV, -950 mV, -1094 mV.*

*While at a potential of -785 mV, it was found that the pipe protection current value is less than the specified criteria. This is in accordance with the NACE standard SP 0169 so that the design of cathodic protection has been designed is acceptable.*

***Keywords: ANSYS thermal electric analysis, NACE SP 0169, Sacrificial Anode Cathodic Protection, Water Injection Pipeline***

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin,

Segala puji bagi Allah Subahanahu wa Ta'ala atas segala nikmat, rahmat, dan karunia yang telah Dia berikan kepada penulis. Tak lupa kepada Rasulullah Muhammad Shallallahu 'alaihi wa Sallam sebagai sosok teladan yang menginspirasi dan sebagai penyemangat penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul: Optimasi Desain Dan Simulasi Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban Pada *Water Injection Pipeline* Pertamina-Petrochina *East Java Tuban Plant*. Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, bapak dan ibu penulis. Terimakasih atas kesabaran dan doa yang tidak terputus-putus untuk keberhasilan dan kebahagiaan penulis. Serta terimakasih kepada Andika Zanur R., adik yang selalu memberikan inspirasi yang membanggakan.
2. Keluarga besar yang juga senantiasa mendoakan yang terbaik dan selalu memberikan dukungan.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan bimbingannya dengan sabar serta memberikan dukungan dan dorongan atas segala langkah yang saya lakukan. Terimakasih atas segala ilmu dan keikhlasannya pak.
5. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, ST., M.Sc., P.hD selaku dosen dosen pembimbing kedua yang selalu sabar mendampingi saya memberikan semangat atas setiap langkah yang saya lakukan. Terimakasih atas segala ilmu dan keikhlasannya pak.
6. Bapak Pitono dan bapak Alvin selaku pembimbing di lapangan yang telah banyak membantu memberikan

informasi penting dan arahan-arahan demi lancarnya tugas akhir ini.

7. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
8. Teman-teman seperjuangan yang setia dan selalu mendukung dalam pengerjaan laporan tugas akhir ini  
Terimakasih

Penulis berharap dengan terselesaikannya laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan dapat membuka bahasan baru di bidang korosi dan di bidang permodelan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penyusun saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Amin.

Surabaya, 12 Januari 2017

Mustika Dwi Erlinda

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 <i>Water Injection Pipeline</i> .....	5
2.2 Konsep Dasar Korosi.....	6
2.2.1 Aplikasi dari <i>Free Energy</i> pada Sel Korosi.....	8
2.2.2 Persamaan Nernst .....	9
2.2.3 Diagram Pourbaix.....	10
2.2.4 Reaksi Katodik dan Anodik.....	11
2.2.5 <i>Helmholtz Double Layer</i> .....	13
2.2.6 Aktivasi Overpotensial .....	15
2.3 Prinsip Dasar Proteksi Katodik.....	16
2.3.1 Desain Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban.....	17
2.3.2 Dasar Kelistrikan pada Proteksi Katodik.....	20
2.3.4 Efek <i>Coating</i> pada Sistem Proteksi Katodik .....	22
2.3.5 Desain <i>Coating</i> .....	23
2.3.6 Perancangan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban ..	24
2.3.7 Desain Anoda .....	29
2.3.8 Pengaruh Lingkungan.....	31
2.3.9 Kelebihan dan Kekurangan SACP .....	33
2.4 Metode Elemen Hingga .....	34

2.4.1 ANSYS .....	35
2.5 Penelitian Sebelumnya .....	36
<b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	41
3.2 Perancangan Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban .....	42
3.2.1 Pegumpulan Data.....	42
3.2.2 Kriteria Proteksi bagi Baja dan Besi Tuang .....	48
3.2.3 Pemeriksaan terhadap Sistem SACP .....	48
3.3 Pembuatan Model Simulasi .....	52
3.3.1 Parameter Keberhasilan Simulasi .....	53
3.3.2 Pemodelan dengan ANSYS 15.0.....	54
3.4 Rancangan Penelitian Simulasi .....	57
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Verifikasi dan Rancang Ulang Desain SACP.....	59
4.1.1 Verifikasi Desain SACP .....	60
4.1.2 Perancangan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban ...	66
4.2 Hasil dan Pembahasan Simulasi .....	70
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran.....	94
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xix</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>xxxvii</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Skema Cara Kerja <i>Water injection pipeline</i> .....	5
<b>Gambar 2.2</b> Pipa <i>Water Injection</i> JOB PPEJ yang mengalami korosi.....	6
<b>Gambar 2.3</b> Reaksi korosi pada Besi .....	7
<b>Gambar 2.4</b> Diagram Pourbaix .....	11
<b>Gambar 2.5</b> Proses Reaksi katodik dan anodic dalam suatu sel korosi.....	12
<b>Gambar 2.6</b> <i>Electrical double layer</i> menunjukkan <i>inner Helmholtz</i> , <i>outer Helmholtz</i> dan layer difusi.....	14
<b>Gambar 2.7</b> <i>Electrical double layer</i> .....	14
<b>Gambar 2.8</b> Diagram polarisasi ( <i>reversible electrode</i> ) .....	16
<b>Gambar 2.9</b> Prinsip Dasar Proteksi Katodik.....	16
<b>Gambar 2.10</b> Skema Proteksi Katodik dengan Anoda Korban	18
<b>Gambar 2.11</b> Instalasi anoda galvanik untuk package anoda .	19
<b>Gambar 2.12</b> <i>Equivalent circuit</i> dari logam yang mengalami proteksi katodik .....	21
<b>Gambar 2.13</b> Proteksi Katodik pada Pipa dengan Coating .....	22
<b>Gambar 2.14</b> Komponen sirkuit listrik pada anoda galvanic ...	30
<b>Gambar 2.15</b> Geometri Plane 223.....	36
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Percobaan.....	41
<b>Gambar 3.2</b> Skema denah <i>water injection pipeline</i> JOB PPEJ	43
<b>Gambar 3.3</b> Aki Yuasa.....	43
<b>Gambar 3.4</b> Kabel tembaga.....	44
<b>Gambar 3.5</b> Pin mild steel dengan panjang 30 cm, diameter 8 mm.....	44
<b>Gambar 3.6</b> Silverline Digital multitester .....	44
<b>Gambar 3.7</b> Meteran .....	44
<b>Gambar 3.8</b> Konfigurasi metode Wenner .....	45
<b>Gambar 3.9</b> Penampang 2D Anoda Magnesium.....	47
<b>Gambar 3.10</b> Geometri tanah sistem SACP 2D .....	52
<b>Gambar 3.11</b> Diagram alir Simulasi 2D SACP .....	54
<b>Gambar 3.12</b> Pemodelan sifat material .....	56

<b>Gambar 4.1</b> Distribusi arus proteksi ketika potensial proteksi sebesar -950 mV .....	72
<b>Gambar 4.2</b> Distribusi arus di sekitar pipa saat potensial proteksi sebesar -950mV .....	73
<b>Gambar 4.3</b> Elemen di sekitar pipa yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -950 mV .....	75
<b>Gambar 4.4</b> Distribusi arus proteksi ketika potensial proteksi sebesar -1094 mV .....	77
<b>Gambar 4.5</b> Distribusi arus di sekitar pipa saat potensial proteksi sebesar -1094 mV .....	78
<b>Gambar 4.6</b> Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -1094 mV .....	81
<b>Gambar 4.7</b> Distribusi arus hasil simulasi SACP pada potensial proteksi -882 mV .....	82
<b>Gambar 4.8</b> Distribusi arus di sekitar pipa hasil simulasi pada potensial proteksi -882 mV .....	83
<b>Gambar 4.9</b> Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -882 mV.....	86
<b>Gambar 4.10</b> Distribusi arus saat potensial proteksi sebesar -785 mV.....	87
<b>Gambar 4.11</b> Distribusi arus proteksi di sekitar pipa ketika potensial proteksinya -785 mV .....	88
<b>Gambar 4.12</b> Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -785 mV .....	91



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> <i>Galvanic Series</i> untuk material dalam tanah dan air	18
<b>Tabel 2.2</b> Desain Densitas Arus pada Pelapis yang berbeda (temperatur operasi di atas 30°) .....	24
<b>Tabel 2.3</b> Kebutuhan arus proteksi baja yang dilindungi .....	25
<b>Tabel 2.4</b> Rekomendasi faktor utilisasi anoda untuk perhitungan desain proteksi katodik.....	26
<b>Tabel 2.5</b> Karakteristik Anoda Galvanis .....	29
<b>Tabel 2.6</b> Data <i>Backfill</i> untuk anoda Magnesium dan Zinc ....	31
<b>Tabel 2.7</b> Resistivitas tanah vs Derajat Korosifitas .....	32
<b>Tabel 2.8</b> Pengaruh klorida, sulfat, dan pH pada korosi pipa bawah tanah.....	33
<b>Tabel 3.1</b> Data struktur pipa.....	42
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi Material Baja API 5L grade B .....	42
<b>Tabel 3.3</b> Data resistivitas tanah pada masing-masing area....	46
<b>Tabel 3.4</b> Komposisi Kimia High Potential Magnesium Anode .....	46
<b>Tabel 3.5</b> Data anoda .....	47
<b>Tabel 3.6</b> Spesifikasi dimensi anoda ( <i>package</i> ) .....	47
<b>Tabel 3.7</b> Properties dari Anoda Magnesium .....	48
<b>Tabel 3.8</b> Hasil Pemeriksaan pad C bulan Januari 2010 .....	49
<b>Tabel 3.9</b> Hasil pemeriksaan pad C bulan Februari 2010 .....	49
<b>Tabel 3.10</b> Hasil pemeriksaan pad C bulan mei 2010.....	49
<b>Tabel 3.11</b> Hasil pemeriksaan pad C bulan agustus 2010.....	50
<b>Tabel 3.12</b> Hasil pemeriksaan pad C bulan Desember 2010...	50
<b>Tabel 3.13</b> Hasil pemeriksaan 10” CPA-PAD C Februari 201650	
<b>Tabel 3.14</b> Hasil pemeriksaan 10” CPA-PAD C Februari 201651	
<b>Tabel 3.15</b> Rancangan penelitian SACP <i>Water Injection</i> .....	51
<b>Tabel 3.16</b> Perhitungan desain proteksi katodik yang digunakan untuk simulasi 2D .....	53
<b>Tabel 3.17</b> ANSYS 15.0 PLANE 223 <i>Coupled Field</i> <i>Analysis</i> .....	55
<b>Tabel 3.18</b> Pemodelan Sifat Material .....	57
<b>Tabel 3.19</b> Tabel Rancangan Simulasi .....	57

<b>Tabel 4.1</b> Tabulasi Perhitungan Desain Proteksi Katodik Pad C - CPA.....	65
<b>Tabel 4.2</b> Perbandingan Hasil perhitungan pada ketiga daerah CPA, Sawah, dan Pad C.....	66
<b>Tabel 4.3</b> Hasil perhitungan desain sistem proteksi katodik dengan pada setiap daerah .....	69
<b>Tabel 4.4</b> Pembebanan Termal simulasi SACP di area PAD C.....	70
<b>Tabel 4.5</b> Pembebanan Elektrik pada simulasi proteksi katodik dengan nilai potensial proteksi sebesar -950 mV .....	71
<b>Tabel 4.6</b> Daftar distribusi arus di sekitar pipa pada saat potensial proteksi sebesar -950 mV .....	74
<b>Tabel 4.7</b> Pembebanan Elektrik pada potensial proteksi -1094 mV .....	76
<b>Tabel 4.8</b> Daftar distribusi arus di sekitar pipa pada saat potensial proteksi sebesar -1094 mV .....	79
<b>Tabel 4.9</b> Pembebanan Elektrik pada simulasi dengan nilai potensial proteksi -882 mV.....	82
<b>Tabel 4.10</b> Distribusi arus di sekitar pipa hasil simulasi pada potensial proteksi -882 mV .....	84
<b>Tabel 4.11</b> Pembebanan Elektrik pada simulasi dengan nilai potensial proteksi -785 mV .....	87
<b>Tabel 4.12</b> Daftar nilai distribusi arus proteksi di sekitar pipa dengan potensial proteksinya -785 mV.....	89



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Joint Operating Body Pertamina Petrochina East Java (JOB P-PEJ) merupakan salah satu perusahaan kontraktor kontrak kerjasama (KKKS) minyak dan gas bumi (Migas) dalam bidang eksplorasi yang terdapat di daerah Jawa Timur Kecamatan Soko Kabupaten Tuban. Pertamina-Petrochina East Java saat ini terdiri dari 2 lapangan yaitu Mudi (Tuban) dan Sukowati (Bojonegoro). Dimana masing-masing lapangan ini terbagi menjadi beberapa *cluster*. Lapangan Mudi dibagi menjadi 3 *cluster* ( pad A, Pad B dan pad C). Sedangkan lapangan Sukowati dibagi menjadi 2 *cluster* (Sukowati A dan Sukowati B). Kemudian minyak dari masing-masing sumur di setiap pad akan dialirkan menuju *Central Processing Area* (CPA). Kemudian hasil minyak berupa *crude oil* akan dialirkan menuju *Palang Station*.

Selain digunakan sebagai transportasi minyak dan gas, pipa juga digunakan untuk mengalirkan air sisa dari proses pengolahan minyak. JOB PPEJ menggunakan sistem *Water Injection Pipeline* yang dialirkan dari CPA menuju ke pad C. *Water Injection Pipeline* ini berfungsi sebagai media transportasi *produce water (multiphase fluida)* dari *separator* yang ada di CPA menuju ke sumur-sumur di area pad C, yaitu Mudi 14, Mudi 6, Mudi 12 dan Mudi 13. Selanjutnya *produce water* yang ada pada masing-masing sumur akan digunakan kembali untuk pengolahan minyak. Hal ini bertujuan untuk efisiensi dari proses pengolahan minyak yang dilakukan. Perlindungan terhadap korosi eksternal yang dilakukan pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ adalah menggunakan sistem proteksi katodik anoda korban dengan pelapis lindung *coal tar enamel wrapping*.

Berdasarkan informasi yang diperoleh menunjukkan telah terjadi korosi selama beberapa tahun terakhir pada *Water Injection Pipeline* milik JOB PPEJ yaitu pada bagian *riser* pipa tepat di bawah tanah, baik pada arah pipa yang menuju CPA maupun menuju pad C. Pihak JOB PPEJ mengatakan bahwa



terjadinya korosi tersebut ditandai dengan menurunnya pembacaan potensial proteksi pada angka sekitar -730 mV. Sedangkan berdasarkan standar NACE SP-01-69 suatu instalasi *cathodic protection* dikatakan terlindungi jika harganya -850 mV sampai dengan -1050 mV vs CSE untuk pipa dengan *coating*. Saat terjadi penurunan tegangan proteksi pihak perusahaan melakukan penambahan anoda pada setiap test point, sehingga potensial proteksi yang terbaca meningkat menjadi sekitar 900 mV tetapi hal ini tidak bertahan lama sehingga terjadi penurunan tegangan proteksi kembali sampai pada terjadinya kebocoran. Intensitas kebocoran yang terjadi cenderung lebih sering pada area pad C. Pada awal pemasangan sistem proteksi katodik anoda korban tahun 2010, sistem ini didesain untuk waktu 20 tahun dengan kebutuhan anoda Magnesium sebanyak 10 buah dan jarak pemasangan tiap anoda adalah 300 m. Namun pada kenyataannya telah terjadi kegagalan dalam waktu kurang dari 20 tahun bahkan setelah dilakukan penambahan anoda sekalipun. Oleh karena keadaan yang belum stabil maka untuk sementara waktu pipa *Water Injection Line* dinonaktifkan dan fungsinya dialihkan melalui pipa yang lain.

Berdasarkan keterangan di atas maka pihak JOB PPEJ bermaksud untuk mengevaluasi dan memperbaiki sistem proteksi katodik anoda korban tersebut sehingga didapatkan sistem desain proteksi katodik anoda korban yang optimal untuk *Water Injection Pipeline*. Kemudian, untuk mendapatkan hasil penelitian yang baik terhadap hasil rancang ulang terutama pada area pad C, yang merupakan daerah yang rawan terjadinya korosi, maka akan dilakukan simulasi pemodelan karakteristik anode *current and voltage distribution* dari desain proteksi katodik untuk segmen pipa yang menuju ke pad C menggunakan konsep metode elemen hingga. Salah satu software yang menggunakan prinsip metode elemen hingga adalah ANSYS. Penggunaan simulasi dengan software ANSYS dilakukan karena lebih efisien waktu dan harga (Tayade, 2015).

---

## BAB I PENDAHULUAN



---

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diidentifikasi dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil evaluasi sistem proteksi katodik anoda korban pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ?
2. Bagaimana hasil rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ?
3. Bagaimana hasil simulasi 2D dari sistem proteksi katodik anoda korban hasil rancang ulang di area pad C pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ?

## 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Sambungan las dari setiap *joint* dianggap sempurna, sehingga keseluruhan pipa merupakan satu kesatuan material yang sama
2. Kondisi operasional dianggap sesuai standar
3. Analisa kimia tanah seperti kandungan sulfat, klorida, serta arus liar diabaikan
4. Proteksi korosi hanya diaplikasikan untuk permukaan luar pipa yang langsung kontak dengan tanah.
5. Simulasi dilakukan hanya pada pipa di area Pad C

## 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengevaluasi sistem proteksi katodik anoda korban pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ
2. Merancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban pada *Water Injection Pipeline* di JOB PPEJ
3. Mensimulasikan hasil rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban untuk area pad C *Water*



*Injection Pipeline* di JOB PPEJ dengan menggunakan software ANSYS untuk menilai kelayakan desain hasil rancang ulang

### **1.5. Manfaat Penelitian**

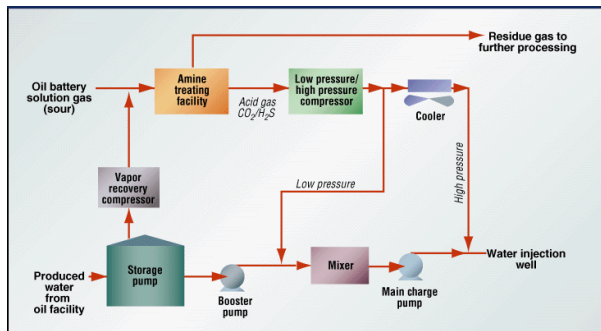
Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapat khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, JOB Pertamina-Petrochina East Java Tuban Plant Indonesia sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian sebagai masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan sistem proteksi katodik anoda korban pada *Water Injection Pipeline* dapat diatasi.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. *Water injection pipeline* JOB PPEJ Tuban *Plant*

*Water injection pipeline* yang berada di JOB PPEJ Tuban *Plant* merupakan salah satu pipa penyalur yang berfungsi untuk menyalurkan *multiphase fluida* hasil produksi minyak dari separator menuju sumur. Karena fungsinya tersebut maka *Water injection pipeline* dapat mengefisienkan proses pengolahan minyak dengan menggunakan kembali *multiphase fluida* yang berasal dari sumur untuk memanaskan minyak yang keluar dari separator. Skema cara kerja *Water injection pipeline* dapat dilihat pada gambar 2.1. berikut,



Gambar 2.1. Skema Cara Kerja *Water injection pipeline* (Dave Kopperson, 1998)

*Water injection pipeline* berhubungan dengan komponen separator, tangki penampung dan *booster pmp*. *Produce water* dari *separator* akan dialirkan melalui sebuah pipa yang menyelubungi pipa berisi minyak, sehingga akan terjadi perpindahan panas antara pipa dengan minyak. *Produce water* akan mengalami penurunan temperatur dari 99°C menjadi 82°C. Sedangkan minyak mengalami kenaikan temperatur dari 43°C menjadi 66°C. Setelah dipisahkan, antara minyak dan *produce water* akan ditampung pada tangki masing-masing, selanjutnya



*produce water* akan didorong oleh *booster pump* sepanjang *Water Injection Pipeline* menuju ke tahap selanjutnya.

Di JOB PPEJ Tuban *Plant* saluran *water injection pipeline* terbentang dari *Central processing Area (CPA)* menuju ke PAD C, pipa *water injection* ini dipasang di dalam tanah sepanjang 2600 m dengan *elbow riser* menggunakan *long radius 45°*. Pipa ini menggunakan baja API 5L grade B *schedule 80* dengan NPS 10". Pipa ini diproteksi menggunakan sistem proteksi katodik anoda korban dengan *coating coal tar enamel wrapping*. Namun, karena desain sistem proteksi katodik yang tidak optimal sehingga pipa *Water Injection* mengalami korosi pada bagian *riser* yang berada tepat dipermukaan tanah. Gambar 2.2. berikut menunjukkan bagian pipa *Water Injection* yang mengalami korosi,



Gambar 2.2. Pipa *Water Injection* JOB PPEJ yang mengalami korosi

## 2.2. Konsep Dasar Korosi

Korosi berasal dari bahasa latin “Corrodere” yang artinya merusak logam atau pengkaratan. Terdapat beberapa definisi korosi menurut para ahli, diantaranya yaitu :

- kerusakan permukaan yang terjadi pada logam ketika diekspos ke lingkungan yang reaktif
- hasil dari interaksi antara logam dengan lingkungannya yang menghasilkan kerusakan setahap demi setahap
- proses kerusakan pada suatu material dikarenakan unsur kimia
- kebalikan dari ilmu ekstraksi metalurgi

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



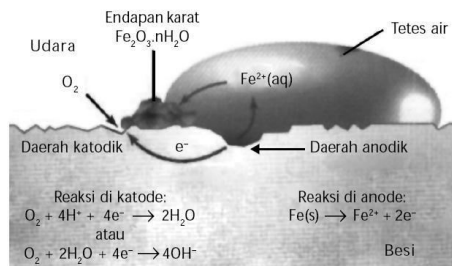
- e. degradasi yang terjadi pada suatu material akibat berkontak dengan lingkungannya (Fontana)
- f. penyerangan yang bersifat destruktif pada suatu logam karena bereaksi secara kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya (Uhlig)

Meskipun banyak perbedaan pendapat mengenai definisi korosi, dapat disimpulkan bahwa pada dasarnya korosi adalah hasil interaksi antara material dengan lingkungannya, oleh karena itu kondisi lingkungan sangat memengaruhi tingkat korosifitas pada suatu material (Ahmad, 2006)

Berdasarkan proses elektrokimia korosi pada logam disebabkan karena logam mempunyai komposisi kimia yang tidak homogen. Akibatnya akan ada perbedaan potensial yang dapat menimbulkan korosi galvanis bila terdapat elektrolit (udara dan air). Gambar 2.3. di bawah mengilustrasikan terjadinya reaksi korosi pada besi. Bagian yang potensialnya rendah akan berperan sebagai anoda sedangkan bagian logam yang berpotensi tinggi akan menjadi katoda. Berikut adalah contoh reaksi korosi pada besi,

Anoda akan larut :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$ , elektron akan menuju ke katoda

Reaksi pada katoda :  $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$



Gambar 2.3. Reaksi korosi pada Besi (Brown, 2012)

Sehingga dapat dikatakan bahwa korosi dapat terjadi jika terdapat unsur-unsur berikut ini:



1. Anoda : Anoda merupakan elektroda yang mengalami oksidasi (berfungsi sebagai *terminal* negatif dari *cell*). Anoda akan mengeluarkan elektron. Elektron tidak larut dalam suatu larutan sehingga mereka hanya bergerak melalui kabel koneksi yang menuju ke katoda,  

$$M \rightarrow M^{z+} + ze^{-}$$
2. Katoda : Merupakan elektroda yang mengalami reaksi proteksi (berfungsi sebagai terminal positif dari *cell*). Terjadi reaksi reduksi yaitu mengonsumsi elektron,
  - Evolusi  $H_2$  dari larutan asam atau netral :  
 $2H^{+} + 2e^{-} \leftrightarrow H_2$  (larutan asam)  
 $2H_2O + 2e^{-} \leftrightarrow H_2 + 2OH^{-}$  (larutan netral dan basa)
  - Reduksi oksigen pada larutan asam atau basa dan netral  
 $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \leftrightarrow 2 H_2O$  (larutan asam)  
 $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \leftrightarrow 4OH^{-}$  (larutan netral atau basa)
  - Reduksi dari oksidator yang terlarut pada reaksi redox seperti :  
 $Fe^{3+} + e^{-} \leftrightarrow Fe^{2+}$
3. Larutan elektrolit sebagai media penghantar listrik, muatan positif yang lewat dari anoda menuju katoda melewati elektrolit akan terlarut sehingga menghantarkan arus.
4. Adanya kontak metalik antar anoda dan katoda sehingga elektron dapat mengalir dari anoda menuju katoda, sedangkan arus mengalir dari katoda menuju anoda (Ahmad, 2006)

### 2.2.1. Aplikasi dari *Free Energy* pada Sel Korosi

Telah diketahui bahwa reaksi korosi menghasilkan energi listrik. Jumlah usaha yang dilakukan oleh sel sama dengan sejumlah energi listrik yang dibangun di bawah tekanan yang konstan, temperatur dan konsentrasi dari reaksi. Dalam reaksi elektrokimia, energi listrik yang dapat digunakan adalah sama dengan produk dari potensial sel dan sejumlah listrik yang termasuk di dalamnya (volt x ampere x waktu). Energi listrik = E

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



x Q, ini sama dengan usaha yang dilakukan oleh sel. Dari hukum faraday, Q adalah setiap massa equivalent dari reaktan. Untuk n gram equivalent dari reaktan, Q sama dengan nF. Usaha hanya dapat ditunjukkan jika *free energy* dari sel menurun,

$$\Delta G = -nFE \quad (2.1)$$

Dimana,

$\Delta G$  = Perubahan dalam *Gibs free energy* dari sel dalam joule per mole

n = jumlah elektron yang ikut bereaksi

E = emf dari sel dalam volt

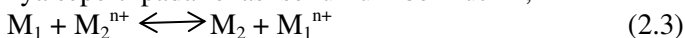
F = nilai konstantan Faraday (96500 C)

Jika terjadi pada kondisi standar (contoh : pada aktivitas unit) maka, persamaan tersebut menjadi (Ahmad, 2006),

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \quad (2.2)$$

### 2.2.2. Persamaan Nernst

Persamaan Nernst menunjukkan sel emf dalam fungsi dari aktivitas produk dan reaktan yang terjadi pada reaksi sel. Ilustrasinya seperti pada reaksi sel umum berikut ini,



$M_1$  dan  $M_2$  menunjukkan elektroda logam seperti Cu dan Zn, di dalam sel dan reaksi di atas dapat dihitung menjadi :



Perubahan energi bebas ( $\Delta G$ ) dari reaksi diberikan oleh perbedaan energy bebas molar dari produk dan reaktan ,

$$\Delta G = \sum n_i \Delta G(i) - \sum n_j \Delta G(j) \quad (2.5)$$

Sehingga, perubahan energy bebas dari reaksi dapat ditulis menjadi :

$$\Delta G^\circ = (G^\circ_{M_2} + \Delta G^\circ_{M_1^{n+}}) - (G^\circ_{M_1} + \Delta G^\circ_{M_2^{n+}}) \quad (2.6)$$

Jika pada kondisi standar maka dapat ditulis sebagai berikut,

$$\Delta G^\circ = (G^\circ_{M_2} + \Delta G^\circ_{M_1^{n+}}) - (G^\circ_{M_1} + \Delta G^\circ_{M_2^{n+}}) \quad (2.7)$$

Energy bebas untuk suatu logam, seperti  $M_1$  pada kondisi standar ataupun tidak, mengikuti reaksi berikut :

$$G_{M_1} - G^\circ_{M_1} = RT \ln a_{M_1} \quad (2.8)$$



Dimana  $a_{M1}$  adalah aktivitas logam  $M_1$  R adalah konstanta gas universal, dan sama dengan 8.314 joule/degree/mole, dan T adalah temperatur absolut dalam Kelvin, °K, dimana pada 25°C (273.16 + t°C)

Mengurangi persamaan (2.6) dari persamaan (2.7), sehingga didapat :

$$\Delta G - \Delta G^\circ = (G^\circ_{M2} - \Delta G^\circ_{M2}) - (G^\circ_{M1} - \Delta G^\circ_{M1}^{n+}) - (G^\circ_{M1} - \Delta G^\circ_{M1}) - (G^\circ_{M2}^{2+} - \Delta G^\circ_{M2}^{n+})$$

Memasukkan persamaan (2.8), sehingga didapat :

$$\Delta G - \Delta G^\circ = RT \ln a_{M2} + RT \ln a_{M1} - RT \ln a_{M1} - RT \ln a_{M2}^{n+} \quad (2.9)$$

$$\Delta G - \Delta G^\circ = RT \ln \left( \frac{a_{M2} a_{M1}^{n+}}{a_{M1} a_{M2}^{n+}} \right) \quad (2.10)$$

Dimana a, nilai pada sembarang nilai aktivitas tertentu, dimana  $\Delta G$  sesuai dengan energy bebas dari reaksi.  $\Delta G^\circ$  adalah perubahan energy bebas dari suatu reaksi standar, sehingga reaksi menjadi

$$E - E^\circ = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{a_{M2} a_{M1}^{n+}}{a_{M1} a_{M2}^{n+}} \right) \quad (2.11)$$

Yang mana,

$$E - E^\circ = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{a_{\text{produk}}}{a_{\text{reaktan}}} \right) \quad (2.12)$$

Persamaan 2.11. merupakan persamaan Nernst yang meunjukkan emf yang termasuk di dalam suatu sel elektrokimia, dalam fungsi R,T,F,n sebagai aktivitas dari produk dan aktivitas dari reaktan, persamaan Nernst ditulis lagi sesuai standar IUPAC, sebagai berikut (Ahmad, 2006) :

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\text{aktivitas dari produk yang teroksidasi}}{\text{aktivitas dar produk yang tereduksi}} \quad (2.13)$$

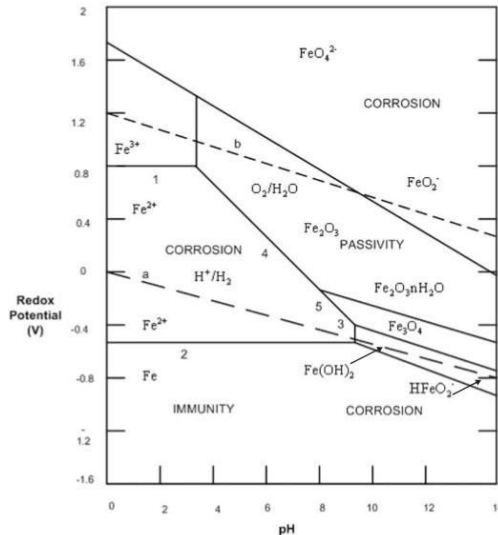
### 2.2.3. Diagram Pourbaix

Diagram Potensial – pH disebut juga diagram Pourbaix. Diagram menunjukkan stabilitas dari logam sebagai fungsi dari potensial – pH. Diagram pourbaix menganalogikan diagram pada fase equilibrium, dimana stabilitas dari berbagai fase ditunjukkan sebagai fungsi dari temperatur dan presentase komposisi dari logam. Diagram ini dihasilkan dari perhitungan berdasarkan persamaan Nernst dan data kelarutan dari logam dan sejenisnya, seperti misalnya Fe, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe(OH)<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, dll pada kondisi

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



ekulilibrium. Diagram Pourbaix dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut ini,

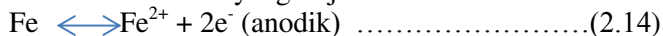


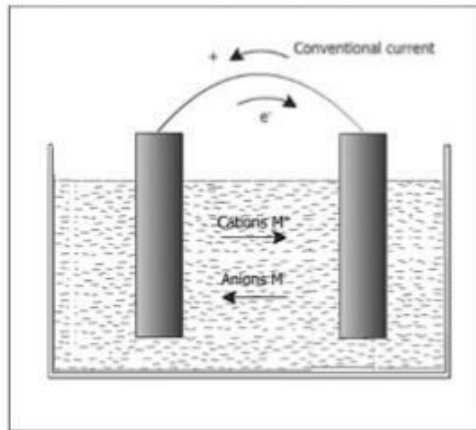
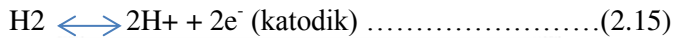
Gambar 2.4. Diagram Pourbaix (Ahmad, 2006)

Diagram pourbaix menyediakan informasi termodinamik yang luas dalam bentuk yang sangat efisien dan padat. Informasi dari diagram dapat digunakan untuk mengontrol terjadinya korosi pada logam murni dalam suatu larutan. Dengan memindahkan nilai potensial dan pH pada daerah imun maka korosi dapat dikontrol. Merubah potensial dari besi ke arah nilai yang lebih negative untuk mengeliminasi korosi, teknik ini disebut dengan proteksi katodik. Selain itu, peningkatan potensial ke arah yang lebih positive juga dapat mengeliminasi adanya korosi dengan membentuk lapisan pasif. (Ahmad, 2006)

#### 2.2.4. Reaksi Katodik dan Anodik

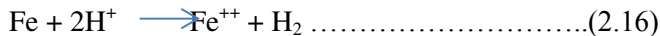
Pada proses korosi besi, dalam suatu larutan asam, berikut adalah dasar reaksi yang terjadi :





Gambar 2.5. Proses Reaksi katodik dan anodic dalam suatu sel korosi (Ahmad, 2006)

Reaksi keseluruhan yang terjadi pada permukaan besi adalah,



Reaksi di atas diilustrasikan dalam gambar 2.5. reaksi anodik di atas menunjukkan transfer atom logam dari *lattice* logam ke elektrolit pada permukaan elektroda/elektrolit *interface*.

Reaksi logam seperti  $\text{M} \rightleftharpoons \text{M}^{z+} + z\text{e}^-$  dapat menjadi *reversible reaction*, selama kecepatan dari reaksi *forward* sama dengan reaksi *reversible* (balik). Sedangkan reaksi tersebut, bukan merupakan *reversible reaction*, selama kecepatan dari *forward reaction* ( $i_f$ ) lebih besar dari kecepatan dari reduksi ( $i_r$ ) dan *net current* mengalir,  $i_{\text{net}} = i_f - |i_r|$ . transfer muatan yang dijelaskan di atas tidak dapat terjadi sampai ada *driving force* yang cukup.

Pada keadaan equilibrium tidak ada *net current*,  $i$  (*forward*) –  $i$  (*reversible*) = 0. Potensial elektroda pada kondisi ekuilibrium adalah  $E_{\text{rev}}$ , dimana kecepatan reaksi *forward* = kecepatan reaksi balik =  $i_0$ ,  $i_0$  disebut ‘Exchange Current Density’.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Hubungan antara *exchange reaction rate* dan densitas arus dapat diturunkan dari hukum faraday,

$$r_f = r_r = \frac{i_0 M}{nF} \dots\dots\dots(2.17)$$

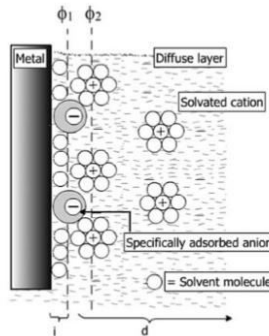
Dimana  $r_f$  adalah kecepatan oksidasi,  $r_r$  adalah kecepatan dari reaksi reduksi yang diekspresikan dalam fungsi densitas arus ( $i_0$ ).

*Irreversibility* dapat dicapai dengan menghubungkan elektroda ke sebuah sumber arus eksternal. Dengan menghubungkan elektroda ke kutub positif dari sumber arus eksternal, elektroda akan menjadi anoda, dan sebaliknya elektroda akan menjadi katoda jika dihubungkan ke kutub negative dari sumber arus listrik. Ketika kecepatan reaksi *forward* lebih besar dibanding kecepatan reaksi balik ataupun sebaliknya maka keadaan sudah tidak lagi ekuilibrium, kondisi seperti ini disebut kondisi '*over potential*' ( $\eta_A$  untuk over potential di daerah anoda, sedangkan  $\eta_C$  untuk over potential di daerah katoda). Dimana  $\eta_A$  bernilai positif sedangkan  $\eta_C$  bernilai negatif.

### **2.2.5. Helmholtz Double Layer**

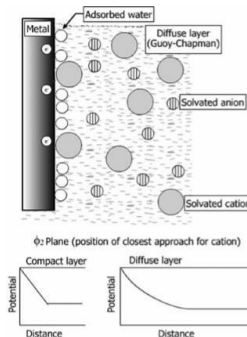
Ketika logam terlarut dalam suatu larutan dengan melepas kation (*positively charge ion*), logam tersebut menjadi bermuatan negative. Semakin banyak ion yang dilepaskan, permukaan logam menjadi meningkat muatan negatifnya. Proses ini berlangsung terus menerus sampai keseimbangan tercapai sehingga untuk setiap kation yang dibentuk harus ada atom logam yang dibentuk oleh proses sebaliknya secara bersamaan.

Pada keadaan ini, kelebihan muatan negative pada permukaan logam seimbang dengan kelebihan muatan kation yang keluar, karena kation dalam larutan melewati logam. Dua layer mempunyai muatan yang berkebalikan, layer dengan muatan negative diiringi layer dengan muatan positif, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. *Electrical double layer* menunjukkan *inner Helmholtz*, *outer Helmholtz* dan layer difusi ( $\phi$  = inner,  $\phi$  = outer) (Ahmad, 2006)

Pemisahan yang terjadi pada muatan seperti pada kapasitor. Oleh Helmholtz Double layer ini dibandingkan dengan plat yang disusun secara parallel. Sehingga perbedaan potensial dihasilkan di antara logam dengan larutan. Pada kondisi standar, perbedaan potensial ini menunjukkan standar potensial elektroda pada batas permukaan logam dengan larutan. Karena pemisahan dari muatan, sebuah medan listrik yang kuat di daerah antara dua layer muatan terbentuk. Karena ketiadaan arus luar, elektroda mempunyai muatan dengan double layer, sehingga kapasitor Cdl terisi muatan, ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut,



Gambar 2.7. *Electrical double layer* (Ahmad, 2006)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA





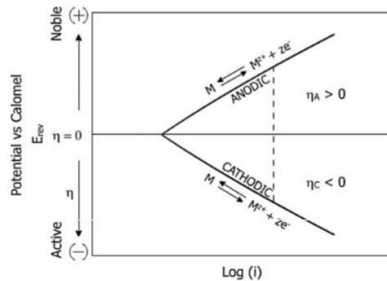
Total arus,  $I_{total}$ , dibagi ke dalam dua bagian, satu melewati double layer, melalui tahanan Faradaic ( $I_F$ ) dan yang lain  $I_{ch}$  (arus dari muatan), dengan nilai yang sangat kecil. Arus Faradaic digunakan dalam reaksi elektroda, dan  $I_{ch}$  disimpan dalam kapasitor Cdl. Dalam beberapa detik atau kurang muatan elektroda mencapai kondisi setimbang dan hal ini proporsional terhadap muatan  $Q = (I \times t)$  dari double layer (gambar 2.7), yang mempunyai energy cukup tinggi untuk mendorong ion melewati double layer.

### 2.2.6. Aktivasi *Overpotential* ( $\eta$ )

Ketika suatu elektroda logam dalam kondisi ekuilibrium, sebagian arus  $i_f$  untuk reaksi ke depan (*forward reaction*) dan sebagian arus  $i_r$  untuk reaksi balik (*reverse reaction*) nilainya persis sama dan berkebalikan. Tidak ada *net current* yang mengalir.

Jika *potential drop* melewati double layer terjadi oleh *superimposing* gaya gerak listrik dari luar (*external electromotive force*), emf, elektroda dipolarisasi dan oleh karena itu ada *deviasi* dari kondisi setimbang. Kelebihan polarisasi diukur oleh perubahan dari potential drop ( $\Delta E$ ) melewati double layer. Perbindahan potensial dari nilai ekuilibrium oleh suatu aplikasi dari arus luar disebut polarisasi. Magnitude dari deviasi dalam fungsi '*over potential*' ( $\eta$ ) yang secara langsung proporsional terhadap densitas arus. Karena adanya polarisasi, keadaan tidak setimbang terjadi dalam sistem. Jika ( $\Delta E$ ) positif, *net current* mengalir,

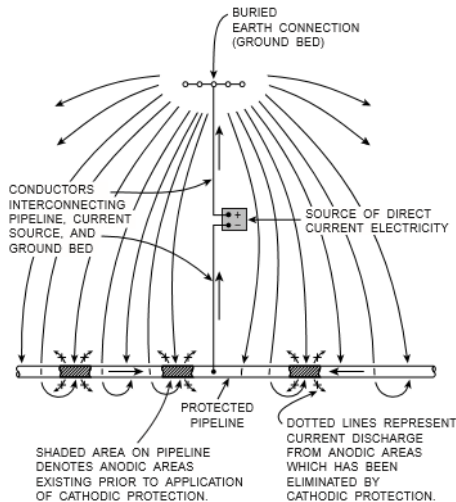
$i_{a,net} = i_f \longleftrightarrow i_r$ , dimana  $i_f > i_r$ , dan jika  $\Delta E$  negative, elektron didorong dalam logam dengan menghubungkan elektroda ke terminal negative dari sumber eksternal dari emf, *net cathodic current* akan mengalir,  $i_{c,net} (i_f \longleftrightarrow i_r)$ , disini  $i_r >> i_f$ . Diagram polarisasi dapat dilihat pada gambar 2.8. berikut,



Gambar 2.8. Diagram polarisasi (*reversible electrode*) (Ahmad, 2006)

### 2.3. Prinsip Dasar Proteksi Katodik

Proteksi katodik adalah teknik untuk mengurangi laju korosi pada suatu permukaan logam dengan membuatnya menjadi katoda dalam sebuah sel elektrokimia. Laju korosi dapat dikurangi jika setiap permukaan logam dari pipa yang diekspos ke lingkungan dapat menerima arus. Gambar 2.9. berikut merupakan prinsip dasar sistem proteksi katodik.



Gambar 2.9. Prinsip Dasar Proteksi Katodik (Peabody, 1967)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Mekanisme dari proteksi katodik adalah memaksa suatu arus searah (DC) menuju ke permukaan pipa. Arus DC ini menggeser potensial pipa pada arah yang lebih aktif (negatif), menghasilkan proses reduksi dalam laju korosi dari logam. Ketika jumlah arus yang mengalir disesuaikan dengan benar, maka akan mengalahkan keluaran arus dari area anoda pada pipa, dan akan ada arus net mengalir ke dalam permukaan pipa pada saat itu. Seluruh permukaan pipa akan menjadi katoda dan reaksi korosi akan berkurang. *Driving voltage* dari sistem harus lebih tinggi dari *driving voltage* dari sel korosi yang terjadi.

Sistem kerja proteksi katodik mengharuskan arus keluar dari koneksi dengan tanah (*ground bed*). Tujuan utama dari *ground bed* adalah untuk mengeluarkan arus. Pada proses keluarnya arus, anoda dalam *ground bed* terkonsumsi karena korosi. Direkomendasikan untuk menggunakan *ground bed* dengan tingkat konsumsi (pounds/ampere/tahun) yang rendah untuk menjamin umur anoda yang lebih lama. (Peabody, 1967).

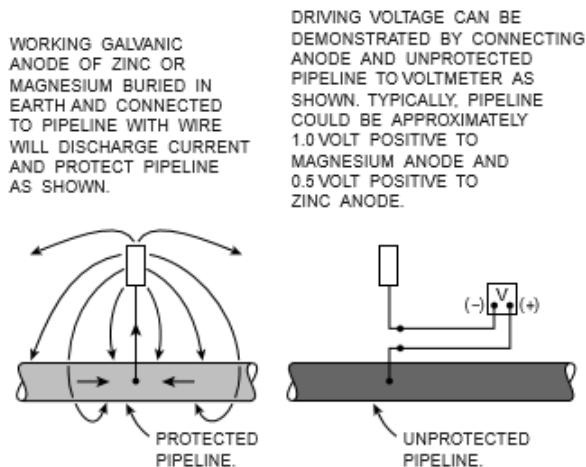
### 2.3.1 Desain Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban

Proteksi katodik anoda korban menggunakan prinsip sel galvanik, dengan menyusun suatu sel dengan logam yang memiliki perbedaan potensial yang besar untuk menghalangi reaksi korosi normal yang terjadi pada pipa. Hal ini dapat ditangani dengan menghubungkan pipa dengan logam yang lebih aktif. Sehingga logam yang lebih aktif akan terkorosi dan memberikan arus pada pipa. Pada kasus proteksi katodik dengan anoda korban, proteksi katodik tidak menghilangkan korosi tapi memindah korosi dari struktur yang akan diproteksi ke anoda korban. Gambar 2.10. menunjukkan proses proteksi katodik dengan prinsip sel galvanik.

Pada keadaan yang normal, arus yang tersedia dari anoda korban sangat terbatas. Untuk alasan ini, proteksi katodik anoda korban biasa digunakan dimana arus yang dibutuhkan untuk proteksi sedikit. Sama halnya, *driving voltage* antara pipa dan anoda terbatas. Sehingga, kontak resistansi antara anoda dengan



tanah (elektrolit) harus lebih rendah dari anoda untuk mengeluarkan sejumlah arus yang cukup. Ini berarti, bahwa untuk instalasi normal, anoda korban diharapkan mampu untuk mensuplai kebutuhan arus di sepanjang pipa.



Gambar 2.10. Skema Proteksi Katodik dengan Anoda Korban (Peabody, 1967)

Pada tabel 2.1. berikut ditunjukkan *galvanic series* dari logam dan paduan yang disusun berdasarkan potensialnya terhadap korosi pada daerah tanah dan air. Dari tabel dapat kita lihat bahwa karbon mempunyai nilai potensial yang paling positif, sebaliknya magnesium mempunyai nilai potensial yang paling negatif.

Tabel 2.1. *Galvanic Series* untuk material dalam tanah dan air (Peabody, 1967)

Material	Potential Volt (CSE)
Carbon, Graphite, Coke	+0.3
Platinum	0 -to -0.1
Mill Scale on Steel	-0.2
High Silicon Cast Iron	-0.2
Copper, Brass, Bronze	-0.2

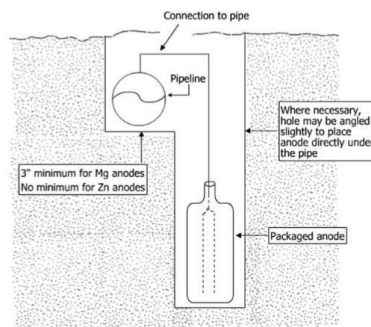
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Mild Steel in Concrete	-0.2
Lead	-0.5
Cast Iron (Not Graphitized)	-0.5
Mild Steel (Rusted)	-0.2 to -0.5
Mild Steel (Clean and Shiny)	-0.5 to -0.8
Commercially pure Aluminium	-0.8
Aluminium Alloy (5% Zinc)	-1.05
Zinc	-1.1
Magnesium Alloy (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-1.6
Commercially Pure Magnesium	-1.75

Terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan dalam memasang proteksi katodik anoda korban, yaitu : kapasitas anoda untuk mengeluarkan arus oleh setiap kilogram bahan, Faktor pengausan (*wastage*) akibat laju hilangnya logam dalam satuan volume maupun satuan massa, Serta efek throwing-power tentang efek proteksi sehubungan dengan jarak anoda ke logam yang dilindungi (Iswahyudi, 2008)

Instalasi anoda galvanik lebih sederhana dari pada instalasi *impressed current*. Gambar 2.11. berikut menunjukkan instalasi *single package anode*,



Gambar 2.11. Instalasi anoda galvanik untuk package anoda  
(Peabody, 1967)



Anoda magnesium pada umumnya berjarak 15 -20 ft dari pipa. jika jarak tidak memungkinkan dan kondisi resistivitas tanah yang sangat rendah, anoda glavanik akan diinstal dibawah pipa. kubangan yang sangat dalam dibutuhkan untuk menempatkan anoda yang banyak (*multiple anode*). Anoda akan lebih aman di dalam tanah yang dalam karena tidak dipengaruhi oleh variasi kelembaban, dan kondisi tanah. Karena perubahan musim maka anoda non-package lebih sering digunakan.

### 2.3.2. Dasar kelistrikan pada proteksi katodik

Pada pipa yang ditanam di dalam tanah, perbedaan potensial muncul antara katoda dan anoda, contoh :

$$\Delta E = (E_a - E_c) \dots \dots \dots (2.18)$$

$\Delta E$  adalah perbedaan potensial. Jika  $R_a$  dan  $R_c$  adalah tahanan yang dikonrol, dan  $E_a - E_c$  mempunyai nilai tertentu dari tanahan sirkuit, arus korosi ( $I_c$ ) akan mengalir. Jika menginginkan suatu struktur bebas dari korosi maka  $I_c$  harus nol.

$$I_c = \frac{E_a - E_c}{R_a + R_c} = 0 \quad (I = \frac{E}{R} \text{ hukum Ohm}) \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana,

$I_c$  = arus korosi (A)

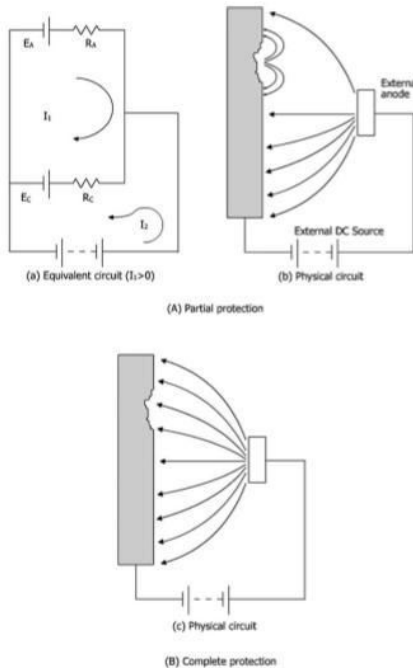
$E_a$  = potensial katoda (V)

$E_c$  = potensial anoda (V)

$R_a$  = resistansi anoda (ohm)

$R_c$  = resistansi katoda (ohm)

Arus korosi dapat dibuat menjadi nol dengan membuat  $R_a + R_c$  sama dengan tak terhingga, contohnya dengan *pointing*. Juga dapat dicapai dengan menyamakan potensial anoda dan katoda, ( $E_a - E_c$ ) sama dengan nol. Struktur dapat dibuat menjadi katoda (negatif) dengan mensuplai arus listrik dari luar sampai potensial menjadi sama dengan potensial dari anoda, dan perbedaan antara  $E_c$  dan  $E_a$  menghilang.



Gambar 2.12. *Equivalent circuit* dari logam yang mengalami proteksi katodik (Ahmad, 2006)

Logam yang secara lengkap diproteksi katodik ditunjukkan pada gambar 2.12 (b), seperti persamaan berikut ini :

$$E_a - E_c = I_1 R_a + R_c (I_1 + I_2)$$
$$I_1 = \frac{E_a - (E_c + R_c I_2)}{R_a + R_c} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana

$E_a$  = open circuit potensial anoda

$E_c$  = open circuit potensial katoda

$R_a$  = effective resistansi anoda

$R_c$  = effective resistansi katoda

$I_1$  = arus dari area anoda

$I_2$  = arus dari eksternal anoda

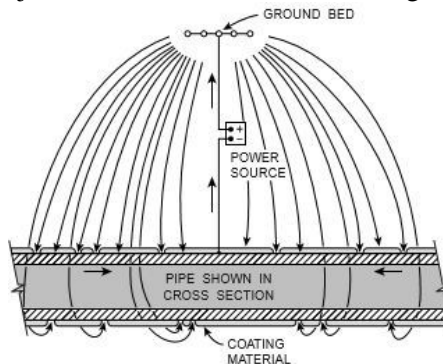
Korosi tidak akan terjadi ketika  $I_1$  sama dengan nol, sehingga  $(E_c + R_c I_2) = E_a$ . Hal ini berarti arus yang cukup harus



mengalir melewati  $R_c$  agar potensial anoda sama dengan potensial dari katoda (*open circuit potential*).

#### 2.3.4. Efek *Coating* pada Sistem Proteksi Katodik

Pada gambar 2.13. menunjukkan arus dari *ground bed* sistem proteksi katodik mengalir ke seluruh area dimana logam pipa diekspos. Dengan demikian, arus korosi yang keluar dari daerah cacat pada anoda berkurang. Sebagai tambahan arus juga mengalir sepanjang material pelapis itu sendiri. Tidak ada material pelapis yang mempunyai sifat insulator yang sempurna. Jumlah arus bergantung pada resistivitas listrik dari material dan ketebalannya. Ketika resistivitas *coating* yang tinggi digunakan arus yang secara langsung lewat ke dalam coating akan diabaikan dibandingkan dengan yang mengalir pada daerah *coating* yang cacat, kecuali jika jumlah dan ukuran dari cacat sangat kecil.



Gambar 2.13. Proteksi Katodik pada Pipa dengan Coating  
(Peabody, 1967)

Penelitian ini menggunakan material pelapis Coal Tar Enamel. *Hot-applied coal-tar enamel* telah digunakan sejak tahun 1930 sebagai perlindungan korosi untuk memproteksi pipa yang mengalirkan air, baik untuk *intenal coating* atau *external coating*. Coal-tar enamel menyediakan garis yang halus saat diaplikasikan ke suatu pipa dan mempunyai *hydraulic friction resistance* yang rendah. Coal-tar enamel *coating* merupakan sejenis komposit





yang dikuatkan dengan material fiber. Hampir semua Coal-tar tidak bereaksi terhadap kelembaban dan kandungan kimia dari tanah. Pelapis Coal tar dapat bertahan selama 20-30 tahun saat digunakan pada pipa bawah tanah yang mengalirkan air (J.J. McManus, 1952). Coal tar adalah cairan berwarna hitam atau coklat dengan viskositas yang tinggi berbau nafta atau *aromatic hydrocarbon* (Didas, 2014).

### 2.3.5. Desain Coating

Berikut adalah beberapa hal yang harus diperhatikan dalam mendesain suatu pelapis pipa,

- a. Insulator elektrik yang efektif  
Karena korosi pada daerah tanah dan garam adalah suatu proses elektrokimia, suatu pelapis pipa harus memberhentikan arus dengan mengisolasi struktur dari lingkungan.
- b. Dapat diaplikasikan ke pelapis pipa dengan *coating defect* yang kecil  
Meskipun demikian tidak ada *coating* yang sempurna sehingga dibutuhkan sistem proteksi katodik
- c. Ketahanan terhadap *holiday*  
Ketika suatu *coating* ditanam, maka dua area yang akan merusak *coating* adalah tekanan dari tanah dan kontaminan dari lingkungan. Tekanan dari tanah pada kondisi yang basah maupun kering dapat membuat area menjadi tipis. Adhesi, kohesi, dan *tensile strength* adalah sifat yang penting untuk mengevaluasi dan meminimalisasi masalah tersebut.
- d. Resistivitas elektrik yang konstan  
Resistivitas elektrik yang tinggi mampu membuat *life time* yang lebih lama
- e. Ketahanan terhadap *disbonding*  
Karena pada suatu pipa pada umumnya diproteksi secara katodik, penting untuk menahan *cathodic disbondement*.
- f. Tipe tanah atau *backfill*  
Kondisi tanah dan *backfill* mempengaruhi sistem *coating* yang dipilih dan ketebalan yang dibutuhkan.



g. Densitas arus yang dibutuhkan

Densitas arus yang dibutuhkan untuk struktur yang ada pada tanah bergantung pada tipe dan performa *coating* yang digunakan. Tabel 2.2. menunjukkan desain densitas arus minimal untuk suatu konstruksi baru.

Tabel 2.2. Desain Densitas Arus pada Pelapis yang berbeda  
(temperatur operasi di atas 30°) (IPS-E-TP-270, 1997)

Tipe Pelapis	Umur pipa (tahun)		
	0-5	5-15	15-30
	Densitas Arus (mA/m <sup>2</sup> )		
Asphalt bitumen dan coal tar, 6 mm Asphalt mastic	0.04	0.1	0.2
Fusion bonded epoxy Liquid epoxy Coal tar epoxy	0.01	0.02	0.05
Polyethylene Polypropylene	0.002	0.005	0.01
Plastic tape (laminated)	0.04	0.1	0.2

### 2.3.6. Perancangan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban

Dalam merancang suatu desain sistem proteksi katodik perlu dilakukan analisa dari segi teknis maupun ekonomis secara matang. Hal ini berfungsi agar sistem proteksi katodik yang diaplikasikan dapat efektif dan menghindari kegagalan dari sistem proteksi katodik. Berdasarkan standar NACE SP 0169 tentang '*Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*' perancangan suatu sistem proteksi katodik dikatakan berhasil jika nilai potensial proteksinya sebesar -850 sampai -1050 mV. Berikut beberapa kriteria perhitungan standar proteksi katodik anoda korban yang harus diperhatikan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



berdasarkan DNV RP B401 tentang ‘*Cathodic Protection Design*’.

**a. Luas Permukaan Pipa**

Luas permukaan pipa yang akan dilindungi dapat diperoleh melalui persamaan berikut,

$$A_c = \pi \times OD \times L \quad (2.21)$$

Dimana,

$A_c$  = luas struktur pipa,  $m^2$

$OD$  = diameter pipa, m

$L$  = panjang pipa, m

**b. Kebutuhan Arus Proteksi**

Sebelum menghitung arus total yang diperlukan, terlebih dahulu harus menentukan rapat arus dari logam yang akan diproteksi disesuaikan dengan kondisi lingkungan di sekitar logam, menurut standar DNV RP B401, Tabel 2.3 berikut menunjukkan kebutuhan rapat arus yang dibutuhkan pada setiap lingkungan,

Tabel 2.3. Kebutuhan arus proteksi untuk baja yang dilindungi (DNV-RP-B401, 2010)

Lingkungan	Rapat arus ( $mA/m^2$ )	
	Baja telanjang	Baja dengan lapis lindung
Air laut	100-110	20-30
Tanah	20-30	0,5

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad (2.22)$$

Dimana,

$I_c$  = arus total untuk proteksi

$A_c$  = luas struktur pipa,  $m^2$

$i_c$  = rapat arus dari logam,  $mA/m^2$

$f_c$  = *Coating breakdown*

Kebutuhan arus proteksi berbeda untuk setiap masa desain, pada awal desain kebutuhan arus proteksi lebih



kecil dibandingkan dengan masa pertengahan dan akhir. Kebutuhan arus proteksi sangat bervariasi terhadap waktu, semakin lama semakin meningkat. Hal ini menandakan coating mulai mengalami kemunduran fungsinya, pada kondisi final, coating akan lebih berkurang lagi karena massa anoda semakin berkurang dan habis termakan

### c. Berat Total Anoda yang diperlukan

$$M = \frac{I_{total} \times t \times 8760}{u \times c} \quad (2.23)$$

Dimana,

M = berat total anoda, kg

$I_{total}$  = Arus proteksi, A

t = waktu proteksi, tahun

c = kapasitas anoda, A-h/kg

u = faktor utilitas ( $0 < \mu < 1$ )

1 tahun = 8760 jam

Tabel 2.4. berikut memberikan rekomendasi faktor utilisasi yang dapat digunakan pada perhitungan berat total anoda,

Tabel 2.4. Rekomendasi faktor utilisasi anoda untuk perhitungan desain proteksi katodik (DNV-RP-B401, 2010)

<i>Anode Type</i>	<i>Anode utilisation factor</i>
<i>Long slender stand-off</i> <i>L 4r</i>	0.9
<i>Short slender stand-off</i> <i>L &gt;4r</i>	0.85
<i>Long flush mounted</i> <i>L 4 width and</i> <i>L 4 thickness</i>	0.85
<i>Short flush-mounted, bracelet and</i> <i>other type</i>	0.8

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



**d. Jumlah anoda yang diperlukan**

$$n = \frac{M_{total}}{M_{anoda}} \quad (2.24)$$

Dimana,

$n$  = jumlah anoda, buah

$M_{total}$  = berat total anoda selama waktu desain, kg

$M_{anoda}$  = berat sebuah anoda, kg

**e. Jarak Pemasangan Antar anoda**

Perhitungan jarak pemasangan antar anoda harus diperhitungkan sehingga potensial proteksi bisa merata,

$$S_a = \frac{L}{n} \quad (2.25)$$

Dimana,

$S_a$  = jarak pemasangan antar anoda, m

$L$  = panjang total pipa, m

$n$  = jumlah anoda

**f. Kebutuhan arus proteksi tiap jarak anoda**

$$I_s = \Pi \times OD \times S \times i_c \quad (2.26)$$

Dimana,

$I_s$  = keperluan arus proteksi berdasarkan jarak pemasangan, A

$OD$  = total diameter pipa, m

$S$  = jarak pemasangan antar anda, m

$i_c$  = rapat arus dari logam, mA/m<sup>2</sup>

**g. Resistansi groundbed anoda**

Terdapat dua pemasangan resistansi anoda, yaitu secara vertikal dan horizontal, untuk pemasangan vertical sebagai berikut,

$$R_v = \left( \frac{\rho}{2 \times \pi \times l} \right) \times \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (2.27a)$$

Sedangkan yang horizontal yaitu sebagai berikut,



$$R_h = \left( \frac{\rho}{2 \pi x l} \right) \times \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \quad (2.27b)$$

Dimana,

$R_h$  = Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal, ohm

$R_v$  = Resistansi anoda yang dipasang secara vertikal, ohm

$\rho$  = tahanan jenis tanah, ohm-cm

$l$  = panjang anoda, cm

$d$  = diameter anoda, cm

#### **h. Kapasitas keluaran arus anoda**

Arus yang dihasilkan oleh anoda korban harus diketahui agar anoda dapat melindungi pipa secara maksimal. Persamaan untuk menghitung kapasitas keluaran arus anoda adalah sebagai berikut,

$$I_a = \frac{E_a - E_c}{R_v} \quad (2.28a)$$

$$I_a = \frac{E_a - E_c}{R_h} \quad (2.28b)$$

Dimana,

$I_a$  = kapasitas keluaran arus anoda, A

$E_a$  = potensial anoda (volt)

$E_c$  = potensial katoda (volt)

$R_h$  = Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal, ohm

$R_v$  = Resistansi anoda yang dipasang secara vertical, ohm

#### **i. Perhitungan umur anoda**

Umur anoda perlu diperhitungkan karena nantinya dapat diprediksi kapan anoda akan habis sehingga persiapan penggantian anoda dapat dilakukan.

$$Y = \frac{W \times K \times u}{I_p \times 87600} \quad (2.29)$$

Dimana :

$Y$  = umur anoda, tahun

$W$  = kebutuhan berat anoda

$K$  = kapasitas arus anoda, A-h/kg



$u$  = faktor utilitas

$I_p$  = kebutuhan arus proteksi, A

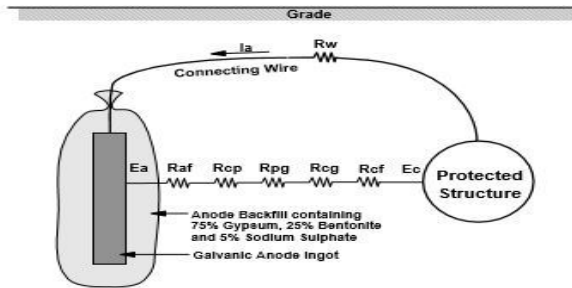
### 2.3.7 Desain Anoda

Anoda merupakan faktor penting dalam suatu instalasi proteksi katodik. Pemilihan anoda dapat disesuaikan dengan kondisi yang ada di lapangan, tabel 2.5. berikut merupakan karakteristik dari masing-masing logam galvanik,

Tabel 2.5. Karakteristik Anoda Galvanis (James B. Bushman, 2015)

Karakteristik	H-1 Alloy (AZ-63) Mag.Alloy	Hi-Potential Mag.Alloy	Hi-Purity Zinc
Potensial larutan terhadap Cu- CuSO <sub>4</sub> , <i>ref.cell</i>	-1.55	-1.80	-1.10
<i>Faradaic Consumption Rate</i>	8.8	8.8	23.5
<i>Current efficiency (%)</i>	25-50	50	90+
<i>Actual apms- hrs/lb</i>	250-500	500	360
<i>Actual lb/amps/year</i>	35-17.5	17.5	26.0

Sirkuit listrik yang dibangun dari arus keluaran pada anoda galvanis digambarkan pada gambar 2.14. berikut ini,



Gambar 2.14. Komponen sirkuit listrik pada anoda galvanik  
(James B. Bushman, 2015)

Dimana,

$E_a$  = potensial dari anoda

$E_c$  = potensial dari katoda

$I_a$  = arus anoda

$R_{af}$  = resistansi lapisan anoda

$R_{ap}$  = resistansi *backfill*

$R_{cf}$  = resistansi lapisan katoda

$R_{cg}$  = resistansi katoda ke tanah

$R_{pg}$  = resistansi *backfill* ke tanah

$R_w$  = resistansi dari kawat penghubung

$R_{cf}$  biasanya diabaikan, dibandingkan dengan komponen resistivitas yang lain.  $R_{af}$  dan  $R_{ap}$  adalah konstan dari anoda yang dipasang dengan *backfill*.  $R_{cg}$ , resistivitas antara katoda dengan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA





elektrolit, ini sangat dipengaruhi kualitas dari struktur *coating*, nilainya akan diabaikan jika struktur yang diproteksi merupakan struktur telanjang. Sehingga, Rpg, Rcg, dan Rw signifikan dan komponen variabel yang harus diperhatikan. Kemudian total resistansi dari anoda yang dipasang serta arus keluaran anoda dapat dihitung menggunakan persamaan (2.14) sampai (2.24) diatas. Peningkatan luasan area dari anoda terutama panjang mempunyai pengaruh resultan arus keluaran yang lebih besar. (James B. Bushman, 2015). Tabel 2.6. berikut menunjukkan spesifikasi dari *backfill* yang biasa digunakan untuk anoda Magnesium dan Zinc,

Tabel 2.6. Data *Backfill* untuk anoda Magnesium dan Zinc (James B. Bushman, 2015)

Gypsum ( $\text{CaSO}_4$ ) %			Bentonite Clay %	Sodium Sulfate %	Approx Resistivity in ohm-cm
	Hydrated	Molding Plaster			
(A)	50	-	50	-	250
(B)	75	-	20	5	50

*Backfill* (A) biasa digunakan dengan anoda Zinc. Sedangkan tipe (B) dengan nilai resistivitas yang rendah berguna untuk lingkungan dengan resistivitas tanah yang tinggi untuk mengurangi resistansi anoda pada tanah.

### 2.3.8 Pengaruh Lingkungan

Penelitian ini menggunakan media tanah sehingga kondisi lingkungan yang akan mempengaruhi sistem adalah kondisi tanah di sekitar sistem. Karakteristik korosi yang terjadi pada media tanah dapat dilihat dari kemampuan tanah untuk menghambat dan menghantarkan arus listrik. Hal ini dipengaruhi beberapa hal di antaranya yaitu tingkat keasaman, kadar oksigen, dan kandungan mineral yang ada dalam tanah. Namun secara garis besar dapat dibagi menjadi dua hal sebagai berikut :



### a. Resistivitas tanah

Resistivitas tanah adalah sifat elektrik dari tanah yang mempengaruhi kemampuan arus untuk mengalir melewati tanah tersebut. Resistivitas adalah fungsi dari kelembaban dan kandungan ion yang terlarut dalam tanah. Faktor tersebut menjadi indikator yang komprehensif dari korosifitas tanah. Biasanya nilai korosifitas yang rendah menghasilkan tingkat korosifitas yang tinggi. Tabel 2.7. berikut menunjukkan tingkat korosifitas tanah berdasarkan nilai resistivitasnya, (Peabody, 1967)

Tabel 2.7. Resistivitas tanah vs Derajat Korosifitas  
(Baboian, 2002)

Resistivitas Tanah (ohm-cm)	Derajat korosifitas
0-500	Sangat korosif
500-1000	Korosif
1000-2000	Moderately Corrosive
2000-10000	Midly Corrosive
Di atas 10000	Progressively less corrosive

### b. Analisa senyawa kimia dalam tanah

Banyak variasi dari garam yang terlarut biasanya ditemukan di dalam tanah. Dua tanah yang mempunyai resistivitas yang sama bisa memiliki karakteristik korosi yang sangat berbeda, tergantung dari kandungan ion yang terdapat dalam tanah. Konstituen yang banyak mempercepat korosi adalah klorida, sulfat, dan keasaman (pH) dari tanah. Kalsium dan Magnesium cenderung membentuk oksida yang tak larut dan persipitat bikarbonat di dalam lingkungan yang basa, yang dapat menciptakan *protective layer* di permukaan logam dan mereduksi korosi. Sebaliknya, klorida cenderung untuk merusak *protective film* dan dapat menyebabkan terjadinya *pitting corrosion*. Sedangkan, konsentrasi dari bikarbonat yang ditemukan dalam tanah cenderung untuk menurunkan resistivitas tanah tanpa meningkatkan aktivitas korosi. Tabel 2.8. menghubungkan

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



pengaruh dari klorida, sulfat, dan pH pada korosi terhadap struktur yang ditanam. Keasaman, yang diindikasikan dengan nilai pH, adalah salah satu faktor agresif yang mempengaruhi tanah. Semakin rendah pH (semakin asam), semakin besar tingkat korosifitas yang terjadi pada struktur logam. Saat pH naik pada nilai  $>7$  (netral), kondisi menjadi lenih basa dan sedikit korosi yang terjadi pada struktur yang ditanam. (Peabody, 1967)

Tabel 2.8. Pengaruh klorida, sulfat, dan pH pada korosi pipa bawah tanah (Commerce, 1962-1971)

Konsentrasi (ppm)	Derajat Korosifitas
Klorida >5000 1500-5000 500-1500 <500	Parah Besar Korosif Ambang
Sulfat >10000 1500-10000 150-1500 0-150	Parah Besar Positif Diabaikan
pH <5.5 <5.5-6.5 <6.5-7.5 >7.5	Parah Sedang Netral Tidak terkorosi (alkaline)

### 2.3.9 Kelebihan dan Kekurangan SACP

Ada beberapa manfaat penting yang mendasari penggunaan anoda korban :

- Tidak membutuhkan sumber arus – berdasarkan kenyataan bahwa arus proteksi dihasilkan oleh reaksi elektrokimia antara logam, tidak ada energy dari luar yang dibutuhkan
- Biaya pemasangan dan pemeliharaan berkurang – pada umumnya, anoda galvanik tidak membutuhkan tambahan



*right of way* karena anoda biasanya dipasang didekat struktur yang akan diproteksi. Sekali dipasang, sangat sedikit pemeliharaan yang dibutuhkan.

- c. Efisien dan tidak ada interfensi – pemasangannya biasanya dangkal dan terdistribusi dengan baik, arus keluaran dari anoda korban dapat menghasilkan densitas arus yang konstan terhadap struktur yang diproteksi.

Kelahiran sistem anoda korban yang telah disebut di atas dapat diaplikasikan pada beberapa keadaan, seperti :

- a. Untuk pipa dalam tanah yang *dicoating* dengan baik
- b. Dalam area pedesaan dan *offshore* dimana tidak ada sumber energi
- c. Untuk proteksi tambahan, seperti persimpangan pipa
- d. Pada area yang diisolasi (*hot spot*)
- e. Pada area perkotaan yang padat dimana distribusi arus cenderung bermasalah
- f. Pada struktur yang terdiskontinu secara elektrik

Meskipun demikian, sistem anoda galvanis mempunyai kekurangan yaitu potensial proteksi yang dihasilkan antara katoda dan anoda kecil. *Driving voltage* menghasilkan arus keluaran yang terbatas, khususnya pada daerah yang memiliki nilai resistivitas tanah yang tinggi. Kenyataan yang membatasi penggunaan anoda galvanis adalah pada struktur yang besar dan struktur yang pelapisnya jelek (James B. Bushman, 2015).

## 2.4. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) adalah salah satu metode numerik untuk menyelesaikan berbagai problem rekayasa, seperti mekanika struktur, mekanika tanah, mekanika batuan, mekanika fluida, hidrodinamik, aerodinamik, medan magnet, perpindahan panas, dinamika struktur, mekanika nuklir, aeronautika, akustik, mekanika kedokteran dan sebagainya. (Katili, Irwan. 2008). Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti jalan pembebanan

---

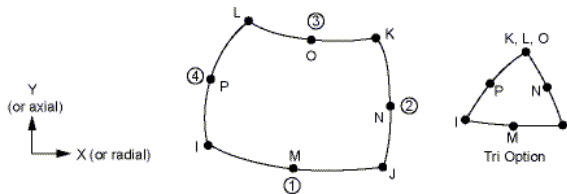
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji. Penyelesaian analisis dari suatu persamaan diferensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini. Metode ini akan melakukan pendekatan terhadap harga-harga yang tidak diketahui pada setiap titik secara diskrit. Dimulai dengan pemodelan dari suatu benda dengan membagi-bagi dalam bagian yang kecil secara keseluruhan masih mempunyai sifat yang sama dengan benda utuh sebelum terbagi dalam bagian yang kecil (diskritasi). (Helmi Fauzi, 2013)

#### 2.4.1. ANSYS

ANSYS merupakan sebuah *software* berbasis *finite element method* yang dapat digunakan untuk analisa distribusi tegangan, temperatur, elektromagnetik dll. ANSYS apdl adalah salah satu jenis ANSYS *parametric design language* dan dapat digunakan untuk membangun model dengan parameter tertentu. Pada penelitian ini akan dilakukan analisa distribusi potensial listrik dalam suatu sistem SACP, menggunakan tipe elemen plane 223. Plane 223 memiliki kemampuan menganalisa, struktur – thermal, piezoresistive, electroelastic, piezoelectric, thermal-elektrik, structural-termoelektrik, termal-piezoelektrik, structural-diffusion, termal-difusi, structural-termal-disfusi. Plane 223 mempunyai delapan node dengan empat derajat kebebasan tiap nodenya. Kemampuan termal-elektrik dari elemen ini termasuk analisa Seebeck, Peltier, dan Efek Thomson serta pemanasan Joule. Gambar 2.4. berikut menunjukkan geometri plane 223,



Gambar 2.15. Geometri Plane 223 (ANSYS 15.0)

## 2.5. Penelitian Sebelumnya

F. Brichau dan J. Deconinck (1993) melakukan penelitian mengenai model numerik untuk sistem proteksi katodik pada pipa yang ditanam menggunakan metode *coupled Boundary Element Method* dan *Finite Element Method*. Hasil distribusi potensial pada tanah menunjukkan korelevan terhadap hasil eksperimen sehingga metode ini sesuai untuk memodelkan sistem proteksi katodik.

Srinivasan (2003) melakukan penelitian mengenai *current mapping and cathodic protection design system* pada suatu konkrete agar dihasilkan distribusi yang *uniform* di seluruh struktur setiap waktu. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa untuk mendesain suatu sistem proteksi katodik yang dapat menghasilkan *uniform distribution* dari arus proteksi pada seluruh struktur dapat dilakukan dengan menggunakan metode numerik yaitu menggunakan *Finite Element Method*. Kemudian hasil dari metode numerik perlu untuk divalidasi dengan menerapkan sistem yang telah di desain pada struktur bangunan yang akan diproteksi.

A. Muharemovic, H.Zildzo dan E. Lectic (2008) melakukan penelitian mengenai distribusi potensial proteksi pada sistem proteksi katodik menggunakan kombinasi metode *Finite Element Method* dan *Boundary Element Method*. Desain dari proteksi katodik membutuhkan suatu penentuan densitas arus yang sesuai dengan kriteria, dan untuk memastikan distribusi dari densitas arus adalah seragam pada seluruh permukaan struktur. Metode elemen hingga cocok digunakan untuk menyelesaikan *bounded domain* yang digunakan untuk diskretisasi pada daerah

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



anoda dan katoda. Sedangkan metode elemen batas dapat digunakan untuk mendiskretisasi daerah yang tidak terbatas seperti elektrolit. Prinsip *modelling* yang digunakan yaitu berbasis analisis elektrostatik yang ditetapkan oleh persamaan laplace yang berkaitan dengan kondisi batas.

Jianhua Wu (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh posisi elektroda dan arus keluaran pada korosi yang berhubungan dengan medan electromagnet dari kapal. Model disimulasikan menggunakan software Beasy dengan basis *Boundary Element Method*. Hasil menunjukkan bahwa optimasi posisi elektroda serta arus keluaran dari anoda memainkan peranan penting dalam mengontrol terjadinya korosi.

S.Fonna (2012) pada penelitiannya mengembangkan dan mengaplikasikan Boundary Element Method (BEM) 3D domain tak hingga untuk mengevaluasi sistem proteksi katodik anoda korban *submersible pump* yang bekerja pada lingkungan air laut. Evaluasi yang dilakukan didasarkan pada pengaruh jarak anoda korban terhadap distribusi nilai potensial pada permukaan pompa. Hasil dari penelitian tersebut menjelaskan bahwa jarak anoda dengan pompa berpengaruh terhadap distribusi potensial di bagian luar pompa sehingga variabel ini menjadi penting dalam merancang suatu sistem proteksi katodik anoda tumbal.

P. Marcassoli (2014) juga melakukan penelitian mengenai pemodelan distribusi potensial pada subsea pipeline dibawah sistem proteksi katodik anoda tumbal menggunakan *finite element method 2D*. Penelitian tersebut dilakukan untuk mendapatkan interpretasi yang akurat mengenai *potential profile* dan *potential gradient* yang dihasilkan dengan meninjau *coating damage*. *Electric field* yang ada di dekat *coating defect* dimodelkan menggunakan *2D finite element method analysis* menggunakan persamaan *ohmic drops* dan *overpotentials* yang berkaitan dengan proses elektrokimia. Terjadi korelasi yang baik antara nilai *ohmic drop* yang terukur dengan ukuran *defect* yang menunjukkan parameter geometri dari *domain*. Menggunakan *parametric equation* dihasilkan interpolasi dari koefisien yang



menunjukkan *linear trends*. Selanjutnya hubungan antara ukuran *coating defect*, dan *ohmic drop* terukur, Kedalaman laut serta kedalaman yang terendam oleh lumpur dapat ditemukan. Hubungan antara ukuran *minimum coating defect* yang terdeteksi oleh lumpur dengan kedalaman dalam lumpur dapat diperoleh.

Ibrahim (2015) melakukan simulasi numerik mengenai pengaruh derajat aerasi dan sifat psikometri dari tanah terhadap korosi eksternal dan desain proteksi katodik pada *buried pipeline*. Penelitian ini menggunakan prinsip *finite element method* dalam memodelkan kegagalan dari pelapis pipa untuk memprediksi degradasi yang terjadi pada kondisi tanah dan lingkungan yang berbeda pada suatu sistem proteksi katodik dengan menggunakan software Comsol Multiphysic 4.3. Perlakuan yang dibentuk dalam model yaitu pengaruh dari perpindahan panas, transport muatan, difusi oksigen pada sistem proteksi yang juga dilakukan eksperimen untuk mendukung hasil simulasi. Pipa yang digunakan pada eksperimen yaitu API- X100. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa tanah pasir dan tanah liat menjadi penyebab sebagian besar terjadinya korosi, dimana kondisi yang lembab menghambat difusi dari oksigen, sehingga memicu terjadinya evolusi hydrogen. Lokasi dari *coating breakdown* bergantung relatife terhadap permukaan tanah, dan anoda yang digunakan pada sistem proteksi mempunyai pengaruh tertentu pada profil konsentrasi oksigen dan korosi pada pipa. Aplikasi kombinasi FEM/BEM telah terbukti efisien untuk digunakan sebagai optimasi sistem proteksi katodik.

S.H. Xing (2015) melakukan penelitian mengenai optimasi jumlah, lokasi dan keluaran arus dari anoda untuk meningkatkan pengaruh dari proteksi katodik pada Semi-Submersible Crane Vessel (SSCV) menggunakan *Boundary Element Method*. Pada penelitian ini optimasi dilakukan pada empat keadaan, dimana menunjukkan perubahan peletakkan anoda secara otomatis dan penyesuaian arus keluaran telah terbukti meningkatkan kemampuan dari proteksi katodik.

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA





Robert A. Adey dan John Baynham (2016) dalam penelitiannya yang berjudul ‘Design and Optimisation of Cathodic Protection Systems Using Computer Simulation’ menjelaskan aplikasi dari software Beasy dalam mendesain performa dari sistem proteksi katodik menggunakan prinsip *Boundary Element Method*. Penggunaan software memungkinkan untuk memodelkan performa sistem proteksi katodik dan menilai pengaruh dari unsur kelistrikan yang ada dalam suatu sistem proteksi katodik.



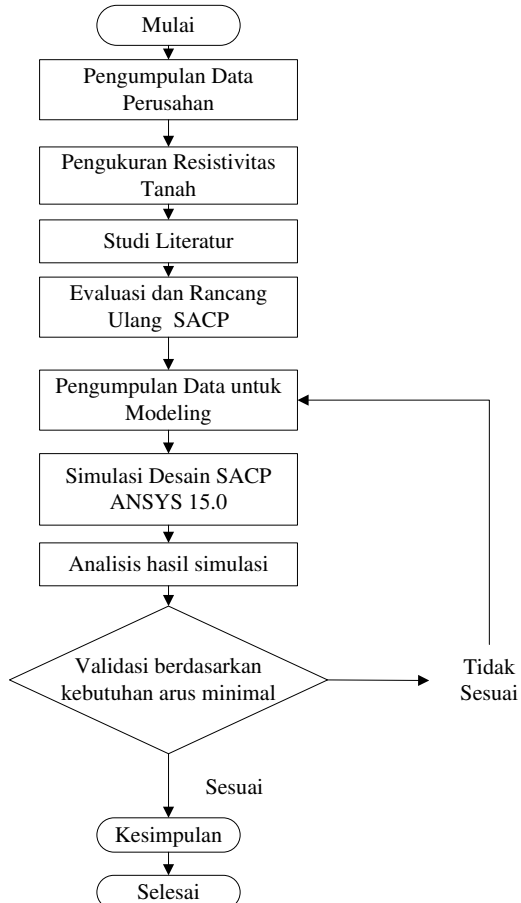
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Dibawah ini adalah diagram alir penelitian yang telah dilakukan,



Gambar 3.1. Diagram Alir Percobaan



### 3.2. Perancangan Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban

#### 3.2.1. Pengumpulan Data

Sebelum mendesain sistem proteksi katodik anoda korban *water injection pipeline* pad C – sawah - CPA langkah pertama yang dilakukan yaitu mencari informasi serta data-data terkait yang dapat mendukung perancangan sistem proteksi katodik anoda korban. Data yang digunakan pada penelitian ini diambil dari dua sumber, pertama data primer yang diperoleh dari perusahaan JOB Pertamina Petrochina East Java dan data non primer yang diperoleh dari literatur sebagai data pendukung. Data yang diperlukan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data struktur pipa, data lapis lindung, data tanah, kapasitas anoda dan waktu guna, waktu desain, *safety factor*, dan ukuran sebuah anoda.

Data struktur *water injection pipeline* serta lapis lindung yang digunakan pada perancangan desain proteksi katodik anoda korban dapat dilihat pada tabel 3.1. berikut ini,

Tabel 3.1. Data struktur pipa (JOB PPEJ Tuban Plant, 2016)

Material	API 5L grade B Sch 80
Panjang total (m)	2605.8
Diameter dalam (m)	0.254
Ketebalan (m)	0.015
Diameter luar (m)	0.269
Lokasi	Onshore
Kondisi Operasi	Temperatur
Lapis Lindung	82°C - 99°C

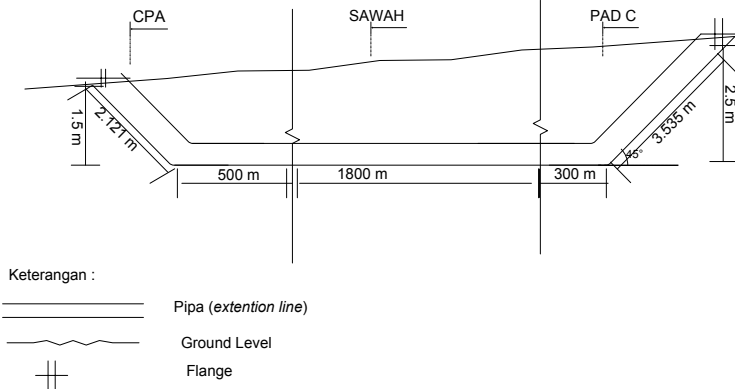
Komposisi dari API 5L grade B adalah pada tabel 3.2. berikut ini,

Tabel 3.2. Spesifikasi Material Baja API 5L grade B (API *Specification for Linepipe Book*, tabel 5 dan 7)

Material	Komposisi Kimia				Kekuatan mekanik	
	C max	Mn max	P Max	S max	Yield Strength (GPa)	Ultimate Tensile Strength (GPa)
API 5L grade B	0.26	1.2	0.03	0.03	0.245	0.415

## BAB II METODOLOGI PENELITIAN

Sedangkan berdasarkan informasi yang telah didapat skema denah pipa dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut, yang akan menunjukkan terbagi menjadi tiga daerah,



Gambar 3.2. Skema denah *water injection pipeline* JOB PPEJ

Setelah mendapat data struktur pipa, maka langkah yang dilakukan selanjutnya yaitu mengukur resistivitas tanah. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan menggunakan metode wenner dengan 4 pin berdasarkan standar ASTM G 57. Rangkaian alat wenner yang digunakan untuk mengukur resistivitas tanah pada jalur pipa *water injection pipeline* PAD C – sawah - CPA, terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut,

1. Aki Yuasa dengan laju pengisian arus 0.5 A x 10 jam dan maksimum arus 0.7 A.



Gambar 3.3. Aki Yuasa



2. Kabel tembaga merek Eterna 2.5 mm<sup>2</sup> (SNI)



Gambar 3.4. Kabel tembaga

3. Empat buah pin mild steel dengan dimensi sama



Gambar 3.5. Pin mild steel dengan panjang 30 cm,  
diameter 8 mm

4. Multitester



Gambar 3.6. Silverline Digital multitester

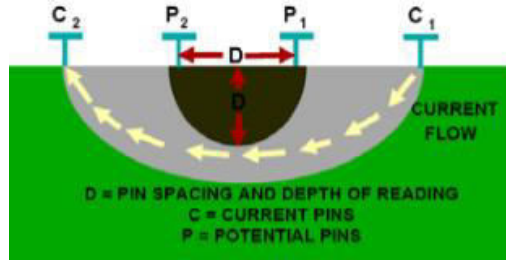
5. Meteran



Gambar 3.7. Meteran

Adapun langkah-langkah pengukuran resistivitas tanah adalah sebagai berikut,

- a. Memasukkan empat pin baja ke dalam tanah pada jarak yang tetap dalam satu garis lurus. Selanjutnya menghubungkan masing-masing pin pada rangkain alat pengukur. Seperti gambar berikut :



Gambar 3.8. Konfigurasi metode Wenner

- b. Dua pin terluar (C1 dan C2) merupakan elektroda arus, sedangkan dua pin pada bagian dalam (P1 dan P2) merupakan elektroda potensial yang mengukur penurunan potensial karena adanya hambatan dari elektrolit (tanah) ketika arus AC dilewatkan di antara pin-pin terluar
- c. Mengukur nilai hambatan secara langsung pada rangkaian alat dan menghitung nilai tahanan jenisnya sesuai persamaan berikut :

$$\rho = 2 \pi a R \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana :

$\rho$  = tahanan jenis tanah (Ohm-cm)

a = jarak antar pin (cm)

R = hambatan yang terukur (Ohm)

$\Pi = 3.14159$

- d. Harus diperhatikan bahwa pengukuran yang dilakukan dengan cara ini menunjukkan nilai rata-rata tahanan jenis tanah pada kedalaman tertentu terkait dengan jarak antara pin- pin yang berdekatan. Kedalaman pin elektroda tidak boleh melebihi  $a/20$ . Tabel 3.3. berikut menunjukkan data resistivitas tanah yang telah diukur



**Tabel 3.3. Data Resistivitas tanah pada masing-masing area**

<i>Location</i>	<i>Spacing (m)</i>	<i>Resistivity (ohm.cm)</i>	Panjang pipa (m)
CPA	0,8	2890,494	500 mendatar dengan kemiringan elbow 45° sepanjang 2,121
Sawah	1,5	263,8975	1800
PAD C	0,6	1180,585775	300 mendatar dengan kemiringan elbow 45° sepanjang 3.535

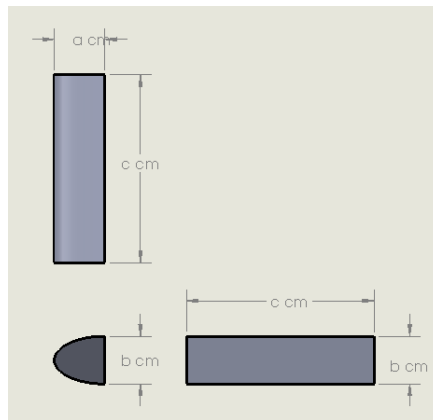
Perusahaan JOB Pertamina-Petrochina East Java menggunakan sacrificial anode yaitu high potential Magnesium anode. Tabel 3.4 berikut menunjukkan komposisi dari high potential magnesium anode,

**Tabel 3.4. Komposisi Kimia High Potential Magnesium Anode (JOB PPEJ Tuban Plant)**

(0.03 max)	Fe	0.01
(0.5-1.3)	Mn	0.56
(0.02 max)	Cu	0.001
(0.05 max)	Si	<0.05
(0.01 max)	Al	0.07
(0.001 max)	Ni	<0.001
Remainder	Mg	Balance
(>500)	Current Capacity (Amp-hr/lb)	550.1
(<1.7 V)	Open Circuit Potential (volts)	1.747

Sedangkan untuk dimensi anoda dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut ini,





Gambar 3.9. Penampang 2D Anoda Magnesium

Untuk spesifikasi ukuran dari anoda magnesium pada gambar 3.9. dapat dilihat pada tabel 3.5. berikut,

Tabel 3.5 Data anoda (JOB PPEJ Tuban Plant)

Jenis anoda	H-1 Magnesium Alloy (bare)		
Massa (kg)	Dimensi : D shape		
14.5	a (cm)	b (cm)	c (cm)
	14.3	13.5	53

Tabel 3.5 di atas adalah kondisi anoda untuk bare anode, sedangkan untuk package anode ukurannya dapat dilihat pada tabel 3.6 berikut,

Tabel 3.6. spesifikasi dimensi anoda (package) (Corpro Companies Europe)

Jenis anoda	H-1 Magnesium Alloy (package)	
Massa (kg)	Dimensi : D shape	
14.5=	diameter (cm)	panjang (cm)
	13.5	53

Properties dari *High Magnesium Anode* dapat dilihat pada tabel 3.7. berikut,



Tabel 3.7. Properties dari Anoda Magnesium (James B. Bushman, 2013)

Jenis Anoda:	High Potential Magnesium Anode
Kapasitas (A.jam /kg)	1230
Effisiensi (%)	50 min
Faktor utilitas (%)	0,8
kerapatan arus anoda (A/m <sup>2</sup> )	10,8
kerapatan (kg/m <sup>3</sup> )	1765
Pengausan teoritik (lb/A.th)	8,7
Pengausan aktual (lb/A.th)	17,4
Open Volatage (V)	1.75
Close Voltage (V)	1.55

### 3.2.2 Kriteria Proteksi bagi Baja dan Besi Tuang

Untuk memastikan apakah proteksi katodik yang diaplikasikan sesuai dengan prinsip kerjanya, diperlukan suatu metode dan kriteria penilaian. Pengendalian korosi eksternal dapat dicapai pada berbagai tingkatan polarisasi katodik bergantung pada kondisi lingkungan yang dihadapi. Kriteria utama proteksi katodik pada pipa baja atau besi tuang yang terpendam dalam tanah atau terbenam dalam air menurut NACE SP 0169 adalah -850 sampai dengan -1050 mV. Namun, perusahaan JOB PPEJ menggunakan batas maksimal proteksi sebesar -1100 mV.

### 3.2.3. Pemeriksaan terhadap Sistem SACP

Pemeriksaan terhadap proteksi katodik JOB Pertamina-Petrochina East Java dilakukan oleh departemen *engineering* bagian divisi *pipeline* dengan peralatan elektroda reference Cu/CuSO<sub>4</sub> dan voltmeter. Pemeriksaan proteksi katodik diawali dengan memeriksa test box yang terdapat di dekat CPA kemudian memeriksa test station pada setiap lokasi dari CPA menuju pad C. Tabel 3.8 sampai dengan tabel 3.14 Berikut adalah data hasil pemeriksaan survey potential proteksi yang dilakukan oleh pihak

## BAB II METODOLOGI PENELITIAN



perusahaan JOB Pertamina Petrochina East Java pada pipa *water injection* 10 inci PAD C –CPA.

Tabel 3.8. Hasil Pemeriksaan pad C bulan Januari 2010 (vs CSE)

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100		
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	1082	Baik
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	1107	<i>Over protect</i>
Pad-C	-850 s/d -1100	882	Baik

Tabel 3.9. Hasil pemeriksaan pad C bulan Februari 2010 (vs CSE)

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100	784	Kurang terproteksi
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	806	Kurang terproteksi
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	889	Baik
Pad-C	-850 s/d -1100	1094	Baik

Tabel 3.10. Hasil pemeriksaan pad C bulan mei 2010 (vs CSE)

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100	751	Kurang terproteksi
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	911	Baik
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	892	Baik
Pad-C	-850 s/d -1100	898	Baik



**Tabel 3.11. Hasil pemeriksaan pad C bulan agustus 2010 (vs CSE)**

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100	759	Kurang terproteksi
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	896	Baik
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	818	Baik
Pad-C	-850 s/d -1100	785	Kurang terproteksi

**Tabel 3.12. hasil pemeriksaan pad C bulan Desember 2010 (vs CSE)**

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100		
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	1082	Baik
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	1071	Baik
Pad-C	-850 s/d -1100	883	Baik

**Tabel 3.13. Hasil pemeriksaan 10" CPA – PAD C Februari 2016 (vs CSE)**

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
Rahayu	-850 s/d -1100		
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100		
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100		
Pad-C	-850 s/d -1100	759	Kurang terproteksi

---

## **BAB II METODOLOGI PENELITIAN**



Tabel 3.14. Hasil pemeriksaan 10” CPA –PAD C Maret 2016 (vs CSE)

Lokasi (UG Water Injection)	Range yang dibutuhkan (-mV)	Hasil Ukuran (-mV)	Status
CPA	-850 s/d -1100	987	Baik
Mejeruk Kampung	-850 s/d -1100	920	Baik
Mejeruk Sawah	-850 s/d -1100	843	Kurang terproteksi
Pad-C	-850 s/d -1100	742	Kurang terproteksi

Dari data di atas dapat diambil kesimpulan bahwa terdapat beberapa daerah yang dilewati oleh *water injection pipeline* yang kurang terproteksi terutama berdasarkan informasi dari perusahaan di area pad C merupakan daerah yang rawan mengalami korosi. Desain sebelumnya menyatakan bahwa sepanjang pipa water injection 10” pad C-CPA membutuhkan kebutuhan anoda sejumlah 10 buah tetapi tidak masih tidak dapat memproteksi *water injection pipeline*. Sehingga dilakukan verifikasi desain sistem proteksi katodik anoda karbon yang kemudian dirancang ulang untuk setiap daerahnya dengan nilai resistivitas masing-masing. Tabel 3.15 berikut menunjukkan rancangan penelitian SACP *water injection pipeline*,

Tabel 3.15. Rancangan penelitian SACP *water injection pipeline*

$\rho$	L	$A_c$	I	n	$S_a$	$I_s$	$I_a$
1444,99 (pad C-sawah-CPA)	2605,8						
263,89 (sawah)	1800						
2890,49 (CPA)	502,121						
1180,59 (pad C)	303,535						

Keterangan :

$\rho$  = Resistivitas tanah (ohm-cm)

L = Panjang pipa (m)

$A_c$  = Luas permukaan yang diproteksi ( $m^2$ )

I = Total kebutuhan arus (Ampere)

n = Jumlah anoda yang dibutuhkan (buah)

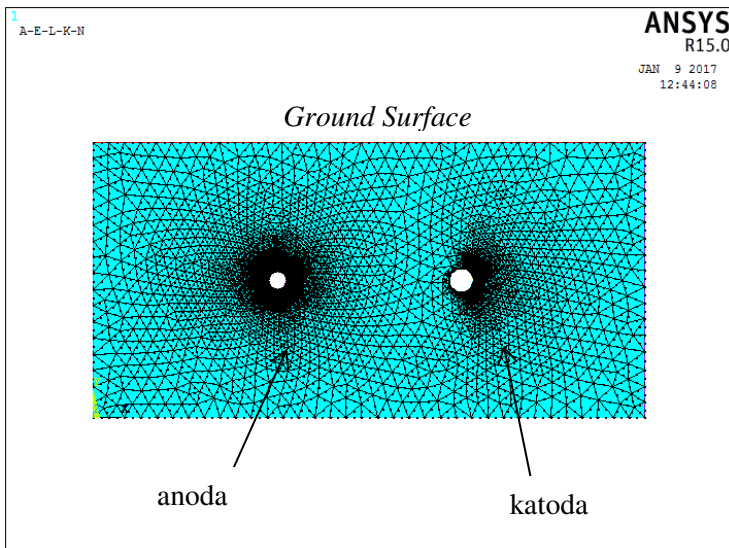
### BAB III METODOLOGI PENELITIAN



- $S_a$  = Jarak penempatan antar anoda (m)  
 $I_s$  = Kebutuhan arus tiap jarak anoda (Ampere)  
 $I_a$  = Keluaran arus dari setiap anoda (Ampere)

### 3.3. Pembuatan Model Simulasi

Setelah dilakukan perhitungan desain rancang ulang, agar mendapatkan hasil yang optimal mengenai penerapan desain di lapangan, maka dilakukan simulasi sistem proteksi katodik anoda korban dengan menggunakan software ANSYS 15.0. Simulasi hanya dilakukan pada area pad C, yang mengalami kemungkinan penurunan proteksi paling banyak. Simulasi dilakukan dalam bentuk 2D *cross section* penampang dari pipa dan anoda. Gambar 3.10. berikut menunjukkan geometri 2D yang merepresentasikan sistem proteksi katodik pipa dan anoda yang ditanam dalam tanah.



Gambar 3.10. Geometri tanah sistem SACP 2D

Gambar 3.10. di atas merepresentasikan geometri sistem proteksi katodik anoda korban 2D. Diameter anoda Magnesium adalah 20.3 cm, sudah termasuk backfill yang digunakan

## BAB II METODOLOGI PENELITIAN



(*prepackaged*). Ukuran geometri yang digambar disesuaikan dengan yang digunakan dalam perhitungan. Kemudian untuk diameter pipa adalah 26.9 cm. Jarak dari pusat anoda sampai dengan pusat pipa adalah 2 m. Jarak antara anoda dan pipa tidak boleh kurang dari 1.5 m (M.Gadala, 2015). Penampang *cross section* dari anoda dan pipa tersebut ditempatkan dalam tanah sebagai elektrolit, dengan nilai resistivitas sebesar 1180  $\Omega\text{cm}$ . Sudut  $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  pada bagian batas pipa disimulasikan sebagai permukaan pipa yang terespos ke permukaan yang merepresentasikan coating breakdown sebesar 75%.

### 3.3.1. Parameter Keberhasilan Simulasi

Parameter keberhasilan dari hasil simulasi mengacu pada kebutuhan arus minimal yang harus dipenuhi oleh pipa dalam proteksi katodik anoda korban pada sistem 2D. Tabel 3.16. berikut menunjukkan kebutuhan arus yang dibutuhkan oleh pipa pada model 2D diatas, dimana diasumsikan sebagai berikut,

Panjang	= 1 unit
densitas arus	= 0.5 mA/m <sup>2</sup>
coating breakdown	= 0.75
Diameter luar	= 0.269 m

Tabel 3.16. Perhitungan desain proteksi katodik yang digunakan untuk simulasi 2D

Perhitungan	Notasi	Angka	Satuan
$A_c$	$\phi \cdot OD \cdot L$	0.845088	m <sup>2</sup>
I	$A \cdot I_c \cdot f_c + 5\%$ faktor keamanan dari arus total	$3.3 \cdot 10^{-4}$	A

Keterangan :

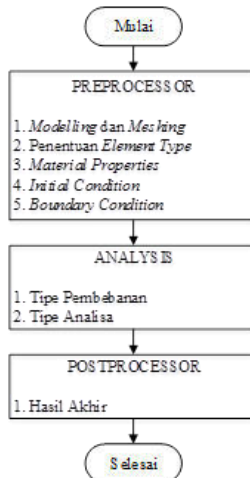
$A_c$	= Luas permukaan pipa yang diproteksi (m <sup>2</sup> )
I	= Arus total yang dibutuhkan (Ampere)
$\phi$ ( $\pi$ )	= 3.14
OD	= Diameter Luar (m)
L	= Panjang (m)



$I_c$  = Densitas arus ( $A/m^2$ )  
 $f_c$  = Coating breakdown

### 3.3.2. Pemodelan dengan ANSYS 15.0

Diagram alir dari simulasi sistem SACP 2D di area pad C menggunakan ANSYS Mechanical APDL 15.0 dapat dilihat pada gambar 3.11. berikut ini,



Gambar 3.11. Diagram alir Simulasi 2D SACP

#### a. Penentuan tipe elemen

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan basic thermal-electric. Tipe elemen yang digunakan adalah PLANE 223 yang mempunyai beberapa kemampuan salah satunya yaitu mensimulasikan fenomena thermal-electric. Elemen ini memiliki 8 node dengan lebih dari empat derajat kebebasan tiap nodenya. Untuk analisa *thermal - electric* kapabilitas yang ditawarkan yaitu dapat menunjukkan distribusi temperature serta potensial. Tabel 3.17. berikut menunjukkan kemampuan *coupled field analysis* dari *thermal - electric*,





Tabel 3.17. ANSYS 15.0 PLANE 223 *Coupled – Field Analysis*

<i>KEYOPT (1)</i>	<i>DOF label</i>	<i>Force label</i>	<i>Reaction Solution</i>	<i>Analysis Type</i>
<i>110</i>	<i>TEMP, VOLT</i>	<i>HEAT, AMPS</i>	<i>Heat flow, Electric current</i>	<i>Static, Full transient</i>

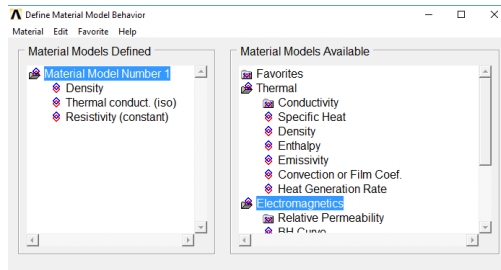
b. *Input material properties*

Material properties yang diinputkan dalam simulasi ini yaitu sifat dari tanah, jenis tanah yang berada di daerah plan JOB PPEJ adalah, *alluvial soil*. Jenis Material property yang digunakan terdiri dari sifat fisik, sifat termal, dan sifat elektrik meliputi densitas tanah, konduktivitas termal dan resistivitas. Nilai dari densitas dan konduktivitas termal didapat dari '*thermal properties of rock*' oleh Eugene C. Robertson tahun 1988. Sedangkan nilai dari resistivitas tanah diperoleh dari pengukuran secara langsung yang dapat dilihat pada tabel 3.3. Pemodelan sifat material yang dimasukkan dalam simulasi dapat dilihat pada tabel 3.18. berikut,

Tabel 3.18. Pemodelan Sifat Material

Sifat Material	Nilai
Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )	1360
Konduktivitas termal ( $\text{W/mK}$ )	0.272
Resistivitas ( $\text{Ohm-m}$ )	11.8

Material properties pada tabel 3.18. yang dimasukkan pada software ANSYS ditunjukkan pada gambar 3.12. berikut ini,



Gambar 3.12. Pemodelan sifat material

c. Meshing

Metode meshing yang digunakan pada 2D tanah yaitu dengan cara free mesh sepanjang luasan geometri 2D. Elemen yang digunakan berbentuk *triangular shape* dengan ukuran menggunakan pengaturan smart size sebesar 1. Hasil meshing dari geometri 2D penampang cross section pipa dan anoda yang ditanam di dalam tanah dapat dilihat pada gambar 3.10 di atas.

d. Pembebanan

Terdapat dua jenis pembebanan yang digunakan yaitu pembebanan thermal dan elektrik. Pada pembebanan thermal akan diberikan nilai temperatur dan heat flux. Temperatur akan dibebankan pada daerah permukaan tanah, dasar tanah dan batas pipa. Sedangkan heat flux akan dibebankan pada daerah selain dari yang dibebankan oleh temperatur. Pembebanan thermal hanya diberikan untuk melengkapi jalannya proses agar sistem menjadi konvergen namun tidak dianalisis lebih lanjut, karena yang akan dianalisis pada penelitian ini yaitu distribusi arus proteksi pada sistem proteksi katodik. Pembebanan utama yang akan dianalisis yaitu pembebanan elektrik yang terdiri dari nilai potensial (volt) dan arus (A) pada kondisi-kondisi yang merepresentasikan sistem SACP yaitu saat potensial proteksi sebesar -950 mV, -1094 mV,



-882 mV dan -785 mV. Pembebanan elektrik berupa potensial akan diberikan pada batas pipa dengan sudut  $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$

e. Tipe analisis

Analisis yang digunakan dalam proses ini adalah analisa *steady state*, dimana akan diamati distribusi arus akibat adanya perbedaan potensial.

f. Validasi

Hasil simulasi harus menghasilkan arus dengan nilai minimal  $3.3 \times 10^{-4}$  Ampere. Validasi hasil simulasi divalidasi menggunakan Microsoft excel 2010 dengan rumus sebagai berikut:

$$K = \text{if} (I_s \geq T_{\min}, "A", "B") \dots \dots \dots (3.1)$$

Dengan :

K = Keterangan A dan B

If = fungsi jika pada excel

Tmin = Batas toleransi minimum

A = Is dapat di aplikasikan

B = Is tidak dapat diaplikasikan

### III. 4. Rancangan Penelitian Simulasi

Rancangan penelitian simulasi dari sistem proteksi katodik anoda korban dapat dilihat pada tabel 3.19 berikut ini,

Tabel 3.19. Tabel Rancangan Simulasi

Potensial Proteksi	Distribusi arus proteksi
-785 mV	
-882 mV	
-950 mV	
-1094 mV	



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini dibahas mengenai dua sub bab utama yaitu sebagai berikut:

1. Verifikasi dan rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban pipa *water injection* JOB Pertamina-Petrochina East Java.
2. Pemodelan simulasi steady state sistem proteksi katodik anoda korban pipa *water injection* JOB Pertamina-Petrochina East Java.

#### **IV.1. Verifikasi dan Rancang Ulang Desain SACP**

Proses yang dilakukan untuk evaluasi dan perancangan desain sistem proteksi katodik anoda korban pada pipa *water injection* meliputi pengumpulan dan pengambilan data serta standar literatur yang digunakan, menentukan kebutuhan arus untuk pipa, menentukan arus yang dikeluarkan dari anoda korban, dan menentukan jumlah dan posisi peletakan anoda yang sesuai dengan standar desain pemasangan proteksi katodik, DNV RP B401 'Cathodic Protection Design' bulan Januari 2005 dan NACE standar SP 0169.1996 section 5.

##### **A. Data teknis Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban *Water Injection Pipeline* JOB PPEJ**

Data pipa *water injection* yang digunakan dalam perhitungan desain adalah sebagai berikut :

- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| 1. Material          | : API 5L grade B Sch 80   |
| 2. Panjang           | : 2605.8 m                |
| 3. Diameter dalam    | : 0.254 m                 |
| 4. Ketebalan         | : 0.015 m                 |
| 5. Diameter luar     | : 0.269 m                 |
| 6. Densitas arus     | : 0.0005 A/m <sup>2</sup> |
| 7. Coating breakdown | : 0.97                    |
| 8. Sistem proteksi   | : SACP                    |
| 9. Umur desain       | : 20 tahun                |



Sedangkan data anoda yang digunakan dalam sistem proteksi katodik adalah,

1. Tipe anoda : high Magnesium GA MG 32 HP
2. Massa tiap anoda : 14.515 kg
3. Dimensi anoda (package) : 203 mm x 711 mm
4. *Potential to electrolyte* : -1.75 V
5. Potensial yang diinginkan : -0.95 V
6. Polarized potential : -0.2 V
7. Driving voltage : 0.6 V
8. Faktor guna : 0.85
9. Faktor keamanan : 0.05
10. Laju konsumsi anoda : 1230 A-jam/Kg
11. Effisiensi : 0.5

Data tersebut telah digunakan sebagai perhitungan desain proteksi katodik berdasarkan pada standar DNV RP-B401 tentang 'Cathodic Protection Design' dan NACE SP 0169 2002 *section 5* guna memverifikasi jumlah anoda korban yang sesuai.

#### IV.1.1. Verifikasi Desain Sistem SACP

1. Luas Permukaan pipa yang diproteksi

Tahap pertama yang dilakukan dalam verifikasi desain SACP adalah mengetahui luas permukaan pipa yang akan diproteksi dengan menggunakan rumus berikut :

$$Ac = \pi \times OD \times L \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana :

$$\text{Phi } (\pi) = 3.14$$

$$\text{Diameter luar pipa (OD)} = 0.269 \text{ m}$$

$$\text{Panjang pipa (L)} = 2605.8 \text{ m}$$

Sehingga,

$$Ac = \pi \times OD \times L$$

$$Ac = 3.14 \times 0.269 \text{ m} \times 2605.8 \text{ m}$$

$$Ac = 2202.13 \text{ m}^2$$



Sehingga untuk panjang pipa sepanjang 2605.8 yang terbentang dari Pad C – CPA memiliki luas permukaan pipa yang diproteksi sebesar 2202.13 m<sup>2</sup>

2. Kebutuhan arus proteksi

Kebutuhan arus ini nanti akan menentukan jumlah anoda yang dibutuhkan. Adapun kriteria kebutuhan arus proteksi dapat dilihat pada tabel 2.3. Untuk kebutuhan arus proteksi dapat ditentukan dengan persamaan berikut,  
 $I_c = A_c \times f_c \times i_c$  .....(2.22)

Dimana :

Luas permukaan pipa yang diproteksi ( $A_c$ ) = 2202.13 m<sup>2</sup>

Faktor coating breakdown ( $f_c$ ) = 0.75

Kerapatan arus ( $i_c$ ) = 0.5 mA/m<sup>2</sup>

Sehingga,

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c$$

$$I_c = 2202.13 \text{ m}^2 \times 0.75 \times 0.0005 \text{ A/m}^2$$

$$I_c = 0.826 \text{ A}$$

Selanjutnya kebutuhan arus tersebut akan ditambah dengan faktor keamanan 5% dari arus yang dibutuhkan, sehingga kebutuhan arus total yang digunakan untuk memproteksi pipa adalah,

$$I_{\text{total}} = I_c + (0.05 \times I_c) = 0.867 \text{ A}$$

Jadi arus proteksi yang dibutuhkan untuk memproteksi pipa dari korosi adalah 0.867 A

3. Kebutuhan berat anoda

Anoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *high Magnesium anode*, 32lb. Berat anoda dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$M = \frac{I_{\text{total}} \times t \times 8760}{u \times c} \text{ .....(2.23)}$$

Dimana :

$$\text{Kebutuhan arus proteksi (} I_{\text{total}} \text{)} = 0.867 \text{ A}$$

$$\text{Umur desain anoda (} t \text{)} = 20 \text{ tahun}$$

$$\text{Faktor utilisasi anoda (} u \text{)} = 0.85$$



Kapasitas elektrokimia anoda (c) = 1230 Ah/kg

Sehingga,

$$M = \frac{I_{total} \times t \times 8760}{u \times c}$$

$$M = \frac{0.867 \times 20 \times 8760}{0.85 \times 1239}$$

$$M = 145.303 \text{ kg}$$

Jadi, berat total anoda yang dibutuhkan untuk memproteksi pipa adalah sebesar 145.303 kg

4. Jumlah anoda

Jumlah anoda yang dibutuhkan untuk proteksi selama 20 tahun dapat dihitung menggunakan rumus berikut,

$$n = \frac{M_{total}}{M_{anoda}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana,

$$\text{Massa total (M}_{total}) = 145.303 \text{ kg}$$

$$\text{Massa anoda (M}_{anoda}) = 14.515 \text{ kg}$$

$$N = \frac{145.303}{14.515} = 11 \text{ buah anoda}$$

Jadi untuk waktu 20 tahun, anoda yang dibutuhkan adalah 11 *high Magnesium anode*

5. Jarak Pemasangan antar anoda

Jarak pemasangan antar anoda sepanjang pipa, dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut,

$$S_a = \frac{L}{n} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana,

$$\text{Panjang pipa (L)} = 2605.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Jumlah anoda (N)} = 11 \text{ buah}$$

Sehingga,

$$S_a = \frac{L}{n}$$

$$S_a = \frac{2605.8}{11}$$

$$S_a = 236.891 \text{ m}$$

Jadi jarak pemasangan antar anoda adalah 236.891 m





6. Kebutuhan arus proteksi berdasarkan jarak antar anoda  
Setelah didapatkan jarak pemasangan antar anoda, maka akan dihitung keperluan arus proteksi untuk tiap jaraknya tersebut, dengan rumus sebagai berikut,

$$I_s = \pi \times OD \times S \times i_c \times f_c \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana,

$$\text{Phi } (\pi) = 3.14$$

$$\text{Diameter luar pipa (OD)} = 0.269 \text{ m}$$

$$\text{Jarak pemasangan antar anoda } (S_a) = 236.891 \text{ m}$$

$$\text{Densitas arus } (i_c) = 0.0005 \text{ A/m}^2$$

$$\text{Coating breakdown } (f_c) = 0.75$$

Sehingga,

$$I_s = \pi \times OD \times S \times i_c \times f_c$$

$$I_s = 3.14 \times 0.269 \times 236.891 \text{ m} \times 0.0005 \text{ A/m}^2 \times 0.75$$

$$I_s = 0.0751 \text{ A}$$

Jadi kebutuhan arus untuk setiap jarak antar ppa adalah 0.0751 A

7. Resistansi *groundbed* anoda secara horizontal

Tahanan anoda dihitung berdasarkan tipe anoda yang digunakan. Tipe anoda yang digunakan pada penelitian ini adalah *prepackage long slender stand off* berdasarkan standar DNV RP B401, dengan panjang anoda (L) lebih dari 4 kali jari-jari pe package anoda, sehingga digunakan rumus sebagai berikut:

$$R_h = \left( \frac{\rho}{2 \pi x l} \right) \times \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.27b)$$

Dimana,

$$\text{Resistivitas tanah } (\rho) = 14.45 \Omega \text{m}$$

$$\text{Phi } (\pi) = 3.14$$

$$\text{Panjang } \textit{prepackage} \text{ (l)} = 0.711 \text{ m}$$

$$\text{Diameter anoda (d)} = 0.203 \text{ m}$$

Sehingga,

$$R_h = \left( \frac{\rho}{2 \pi x l} \right) \times \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right)$$



$$Rh = \left( \frac{14.45}{2 \times 3.14 \times 0.711} \right) \times \left( \ln \frac{4 \times 0.711}{0.203} - 1 \right)$$

$$Rh = 5.3 \, \Omega$$

Sehingga resistansi groundbed anoda yang dipasang secara horizontal adalah 5,3  $\Omega$ . Nilai resistivitas yang dimasukkan dalam perhitungan ini yaitu nilai resistivitas rata-rata di antara ketiga daerah yang dilewati pipa *water injection*, dimana untuk desain rancang ulang selanjutnya perhitungan desain dilakukan pada setiap daerahnya dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda.

8. Kapasitas Keluaran arus anoda

Kapasitas keluaran arus anoda ditentukan oleh desain *protective potential* (-0.95), *open circuit potential* (-1.75 V), serta *polarized potential* (-0.2 V), dapat dicari dengan rumus sebagai berikut (Ahmad, 2006),

$$I_a = \frac{\text{driving voltage}}{Rh} \dots\dots\dots (2.28b)$$

Dimana,

Driving voltage = -0.6 V (nilai ini didapat dari nilai *open circuit potential* (OCP) dikurangi *protective potential* dikurangi *polarized potential*)

Resistansi anoda secara horizontal (Rh) = 7.6  $\Omega$

Sehingga,

$$I_a = \frac{\text{driving voltage}}{Rh}$$

$$I_a = \frac{0.6}{5.3} = 0.113 \, A$$

9. Perbandingan kebutuhan arus antar jarak anoda ( $I_s$ ) dengan arus kelauran anoda ( $I_a$ )

Setelah dilakukan perhitungan untuk memverifikasi desain proteksi katodik maka didapatkan bahwa proteksi terpenuhi karena  $I_a > I_s$ , dengan syarat jumlah anoda sebanyak 11 buah. Penjabaran perhitungan di atas dapat dirangkum pada tabel 4.1 berikut ini,



Tabel 4.1. Tabulasi Perhitungan Desain Proteksi Katodik  
Pad C - CPA

No	Perhitungan	Nilai	Satuan
1	luas permukaan yang diproteksi	2202.13	m <sup>2</sup>
2	kebutuhan arus total	0.867	A
3	berat total anoda	145.303	Kg
4	jumlah anoda	11	buah
5	jarak pemasangan anoda	236.89	M
6	keperluan arus proteksi untuk jarak (Is)	0.075	A
7	tahanan anoda	5.3	Ω
8	keluaran arus anoda total (Ia)	0.113	A
9	arus yang dibutuhkan (Is) vs output anoda (Ia)	Ia > Is	
10	Kesimpulan	Proteksi terpenuhi	

Setelah dilakukan verifikasi perhitungan ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban *Water Injection Pipeline*, didapatkan hasil bahwa kebutuhan anoda untuk dapat menyuplai arus sebesar 0,867 A agar dapat memproteksi pipa adalah 11 buah, dengan arus keluaran dari masing-masing anoda 0,113 A. Terdapat sedikit perbedaan dari perhitungan perusahaan yang menyatakan bahwa anoda yang dibutuhkan adalah 10 buah. Penyebab terjadinya hal ini dapat disebabkan beberapa faktor yaitu kondisi lingkungan yang telah berbeda dari semenjak tahun 2010 sampai sekarang, selain itu juga dari faktor luas pipa yang terlindungi, dimana dari informasi perusahaan bahwa panjang pipa yang digunakan pada perhitungan desain sebelumnya yaitu 2600 m. Sedangkan panjang tersebut belum termasuk panjang elevasi ke atas yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Panjang total *underground water injection pipeline* adalah 2605.8 m

Selanjutnya telah dilakukan perancangan ulang desain sistem SACP agar sistem dapat berjalan lebih optimal

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



menggunakan data yang sudah dikumpulkan. Rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban dihitung untuk setiap area, dimana masing-masing area mempunyai resistivitas yang berbeda-beda. Untuk data nilai resistivitas pada masing-masing daerah dapat dilihat pada tabel 3.3.

#### **IV.1.2. Perancangan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban**

Telah dilakukan perhitungan proteksi katodik untuk area CPA, sawah dan Pad C. Tabel 4.2. berikut menunjukkan rangkuman hasil perhitungan desain proteksi katodik pada area CPA , sawah dan Pad C. Untuk detail perhitungannya dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 4.2. Perbandingan Hasil perhitungan pada ketiga daerah CPA, Sawah, dan Pad C

No	Perhitungan	CPA lama	CPA baru	Sawah	Pad C
1	$A_c \text{ (m}^2\text{)}$	424.2	424.2	1521.2	256.4
2	$I \text{ (Ampere)}$	0.167	0.167	0.599	0.101
3	$M \text{ (Kg)}$	28.003	28.003	100.4	16.929
4	$n \text{ (buah)}$	2	4	7	2
5	$S_a \text{ (m)}$	251.1	125.55	257.14	151.8
6	$I_s \text{ (m)}$	0.08	0.039	0.082	0.048
7	$\rho \text{ (ohm)}$	10.6097	10.093	0.9685	4.333
8	$I_a \text{ (Ampere)}$	0.0565	0.05944	0.619	0.138
9	$I_s < I_a \text{ (Ampere)}$	0.07958 ( $I_s$ ) > 0.0565 ( $I_a$ )	0.039 ( $I_s$ ) < 0.05944 ( $I_a$ )	0.0815 ( $I_s$ ) < 0.619 ( $I_a$ )	0.048 ( $I_s$ ) < 0.138 ( $I_a$ )
10	Kesimpulan	Tidak Terpenuhi	Terpenuhi	Terpenuhi	Terpenuhi

Keterangan :

$A_c$  = Luas permukaan yang diproteksi  
 $I$  = Kebutuhan total arus anoda  
 $M$  = Berat total anoda yang diperlukan  
 $n$  = jumlah anoda yang dibutuhkan

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**



---

$S_a$	= Jarak pemasangan antar anoda
$I_s$	= Kebutuhan arus berdasarkan jarak antar anoda
$\rho$	= Resistivitas tanah
$I_a$	= Arus keluaran anoda

Dari perhitungan proteksi katodik untuk area CPA menyatakan bahwa kondisi proteksi tidak terpenuhi, hal ini dikarenakan keluaran arus dari anoda terlalu kecil sehingga tidak cukup untuk mensuplai kebutuhan arus pada jarak tiap anodanya. Penyebab keluaran arus yang terlalu rendah adalah karena resistansi anoda yang terlalu tinggi berkaitan dengan tingginya resistivitas tanah. Sehingga untuk area CPA maka disarankan untuk melakukan penggantian anoda, menurut DNV RP B401 mengenai ‘Cathodic Protectio Design’ menyatakan bahwa distribusi arus akan lebih merata jika digunakan anoda yang lebih kecil dalam jumlah yang banyak.

Sehingga, untuk desain proteksi katodik anoda korban di area CPA, disarankan menggunakan anoda dengan spesifikasi sebagai berikut (Sumber : Magnesium SuperMAG<sup>TM</sup>, High Potential Anodes):

1. Jenis anoda : High Magnesium Anode (GA-MG 17 HP)
2. *Model number* : 17D3 (berbentuk *D-shape* 17 pound)
3. *Bare/Package* (kg) : 7,7 /20,4
4. Lebar x tinggi x panjang (mm) : 89 x 95 x 654
5. Diameter x overall length (mm) : 191 x 864

Pemilihan anoda dengan massa 17 pound didasari karena anoda ini sudah banyak digunakan di daerah Amerika. Anoda magnesium dengan massa 17 pound dapat menghasilkan 1 A untuk arus D.C. selama satu tahun, sehingga jika dihasilkan 1/10 A, maka umurnya dapat mencapai 10 tahun dibandingkan dengan 3,5 tahun jika menggunakan anoda magnesium dengan massa 5 pound (Anode System Company, 124 North 22 nd Ct, Grand Junction).



Hasil rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban di atas menyatakan bahwa nilai total anoda yang dibutuhkan untuk dapat memproteksi *water injection pipeline* sepanjang CPA-sawah-Pad C adalah 13 buah, dengan distribusi anoda untuk area CPA sebanyak 4 buah anoda dengan tipe anoda *High Potential Magnesium anode 17 lb*, dengan jarak pemasangan antar anoda adalah 125.55 m dan arus keluaran dari setiap anoda adalah 0.0594 A. Kemudian untuk area sawah butuh pendistribusian anoda sebanyak 7 buah dengan jarak masing-masing anoda adalah 257.143 m yang masing-masing anodanya mampu menghasilkan keluaran arus sebesar 0.619 A. Sedangkan pada area pad C dibutuhkan anoda sebanyak 2 buah dengan jarak penanaman antar anoda adalah 151.8 m dengan keluaran arus dari setiap anoda adalah 0.138 A. Untuk lebih jelasnya hasil rancang ulang desain proteksi katodik anoda korban dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini,



Tabel 4.3. Hasil perhitungan desain sistem proteksi katodik dengan pada setiap daerah

Resistivitas tanah (ohm-cm)	Panjang (m)	Luas permukaan (m <sup>2</sup> )	Kebutuhan arus proteksi (A)	Jumlah anoda (buah)	Jenis anoda yang digunakan	Jarak pemasangan anoda (m)	Kebutuhan arus tiap jarak anoda (A)	Arus dari setiap anoda (A)
263.8975 (sawah)	1800	1521.158	0.5989	7	<i>High Potential Magnesium Anode 32 lb</i>	257.1429	0.0815	0.619
2890.494 (CPA)	502,2	424.188	0.167	4	<i>High Potential Magnesium Anode 17 lb</i>	125.55	0.0397	0.0594
1180.586 (pad C)	303,6	256.439	0.101	2	<i>High Potential Magnesium Anode 32 lb</i>	151.8	0.048	0.138
Total kebutuhan anoda				13 buah				



Meskipun dari perhitungan yang telah diverifikasi didapatkan hasil bahwa area CPA membutuhkan pergantian anoda agar dapat memproteksi struktur. Namun, fakta yang ada di lapangan menyatakan bahwa korosi dan penurunan potensial proteksi katodik lebih sering terjadi di area pad C. Sehingga simulasi verifikasi desain pada penelitian ini difokuskan pada pad C sesuai dengan permintaan dari perusahaan.

## IV.2. Hasil dan Pembahasan Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan *basic* fenomena *steady state* thermal-electric sehingga, pembebanan yang diberikan termasuk pembebanan elektrik dan termal, tabel 4.4. berikut menunjukkan pembebanan termal yang diberikan untuk simulasi SACP di area pad C. Pembebanan termal yang diberikan hanya untuk melengkapi proses simulasi sehingga tidak dibahas lebih lanjut.

Tabel 4.4. Pembebanan Termal simulasi SACP di area pad C

Beban	Nilai	Keterangan
Temperature	<i>Ground surface</i> = 303 K	
	Domain bagian bawah = 283 K	
	Pada batas pipa = 355 K	Temperatur kerja pipa <i>water injection</i>
Heat Flux	Pada daerah yang bukan <i>ground surface</i> , domain bagian bawah, serta di bagian batas pipa = 0	

Kebutuhan arus minimal yang harus dipenuhi pada simulasi ini yaitu  $3.3 \times 10^{-4}$  Ampere, sesuai dengan hasil perhitungan pada tabel 3.16. Nilai potensial proteksi ( $E_{app}$ ) yang digunakan pada simulasi ini yaitu -950 mV, berdasarkan pada nilai yang dimasukkan dalam desain perhitungan proteksi katodik.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



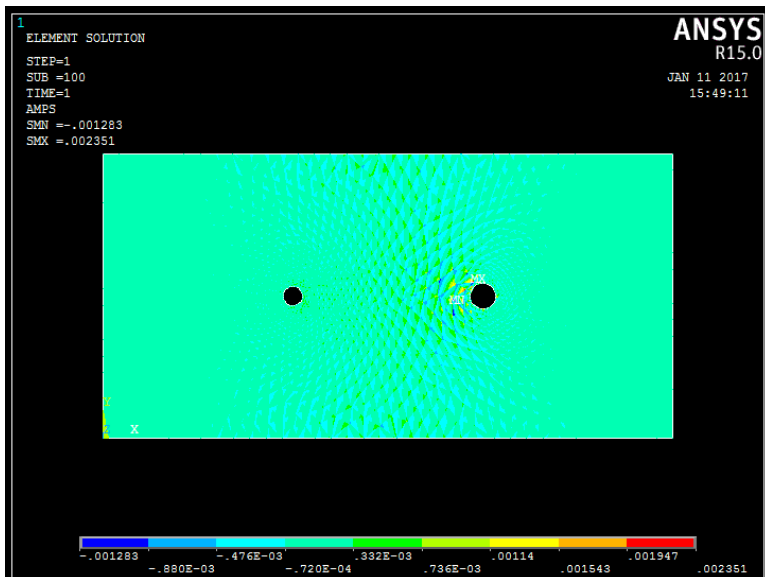


Potensial proteksi ( $E_{app}$ ) adalah selisih dari potensial katoda dikurangi oleh potensial anoda, dimana untuk setiap simulasi potensial dari anoda diatur pada nilai yang konstan yaitu -1.75 V. Pembebanan elektrik dari proses proteksi katodik dengan potensial proteksi sebesar -950 mV ditunjukkan pada tabel 4.5. berikut ini,

Tabel 4.5. Pembebanan Elektrik pada simulasi proteksi katodik dengan nilai potensial proteksi sebesar -950 mV

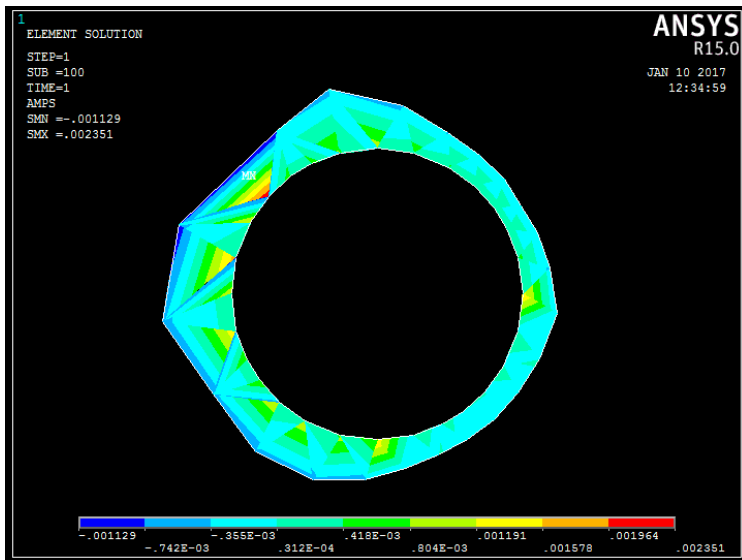
Kondisi proteksi	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -0.95 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos = $E_{app} + E_{anoda} = -2.7$ V	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{app} = -0.95$ V
	Arus	Selain pembebanan pada sisi anoda dan pipa yang terekspos = 0 A	Terinsulasi elektrik

Dengan pembebanan elektrik seperti pada tabel 4.5. maka distribusi arus proteksi ketika potensial proteksinya sebesar -950 mV dapat dilihat pada gambar 4.1. berikut ini,



Gambar 4.1. Distribusi arus proteksi ketika potensial proteksinya sebesar -950 mV

Dari gambar 4.1. dapat dilihat bahwa distribusi arus proteksi pada potensial proteksi sebesar -950 mV paling dominan berada pada range  $0.72 \times 10^{-4}$  Ampere sampai dengan  $3.32 \times 10^{-4}$  Ampere yang direpresentasikan dengan warna biru mendekati hijau. Nilai tersebut berada di atas batas minimal arus yang diperlukan. Untuk lebih jelasnya distribusi arus di sekitar pipa dapat dilihat pada gambar 4.2. berikut ini,



Gambar 4.2. Distribusi arus di sekitar pipa saat potensial proteksi sebesar -950 mV

Pada gambar 4.2. dapat terlihat jelas gradient perbedaan distribusi arus di sekitar pipa dari sudut 0° sampai 360°. Gradient nilai arus tersebut berbeda pada setiap elemen, ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut ini,



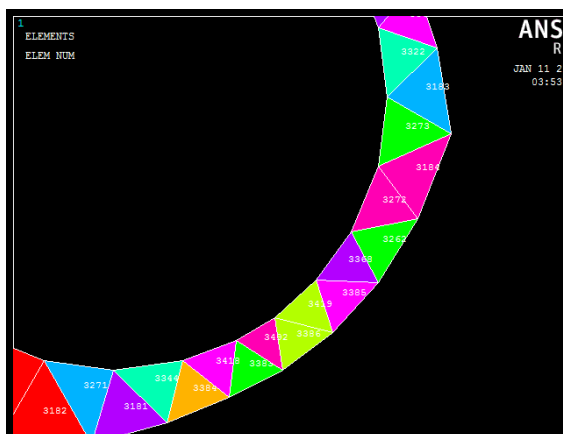
**Tabel 4.6 Daftar distribusi arus di sekitar pipa pada saat potensial proteksi sebesar -950 mV**

Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen	Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A			
$2.50 \times 10^{-5}$	3419	$6.53 \times 10^{-4}$	3367
$7.20 \times 10^{-5}$	3386	$6.77 \times 10^{-4}$	3180
$8.31 \times 10^{-5}$	3492	$7.59 \times 10^{-4}$	3267
$8.63 \times 10^{-5}$	3385	$7.63 \times 10^{-4}$	3269
$1.05 \times 10^{-5}$	3368	$7.87 \times 10^{-4}$	3322
$1.66 \times 10^{-4}$	3383	$8.02 \times 10^{-4}$	3414
$2.00 \times 10^{-4}$	3262	$8.09 \times 10^{-4}$	3270
$2.05 \times 10^{-4}$	3418	$8.21 \times 10^{-4}$	3183
$2.39 \times 10^{-4}$	3272	$8.64 \times 10^{-4}$	3415
$3.62 \times 10^{-4}$	3489	$8.98 \times 10^{-4}$	3181
$4.03 \times 10^{-4}$	3384	$9.27 \times 10^{-4}$	3182
$4.24 \times 10^{-4}$	3460	$9.31 \times 10^{-4}$	3417
$4.35 \times 10^{-4}$	349	$9.35 \times 10^{-4}$	3002
$4.39 \times 10^{-4}$	3413	$9.71 \times 10^{-4}$	3416
$4.39 \times 10^{-4}$	3461	$9.73 \times 10^{-4}$	3179
$4.59 \times 10^{-4}$	3382	$1.01 \times 10^{-3}$	3271
$4.74 \times 10^{-4}$	3365	$1.08 \times 10^{-3}$	2726
$4.97 \times 10^{-4}$	3491	$1.24 \times 10^{-3}$	2542
$4.99 \times 10^{-4}$	3412	$1.28 \times 10^{-3}$	3366
$5.02 \times 10^{-4}$	3184	$1.30 \times 10^{-3}$	3268
$5.17 \times 10^{-4}$	3261	$1.46 \times 10^{-3}$	2541
$5.27 \times 10^{-4}$	3344	$1.65 \times 10^{-3}$	2133
$5.59 \times 10^{-4}$	3363	$2.24 \times 10^{-3}$	2540
$5.79 \times 10^{-4}$	3264		
$5.88 \times 10^{-4}$	3265		
$6.33 \times 10^{-4}$	3273		
$6.52 \times 10^{-4}$	3266		

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Tabel 4.6. di atas menunjukkan perbedaan distribusi arus yang berada di sekitar pipa pada potensial proteksi -950 mV. Perbedaan distribusi arus di sekitar pipa berkaitan dengan posisi penempatan anoda terhadap pipa, dimana daerah terdekat pipa memiliki nilai arus proteksi paling tinggi, yang ditunjukkan oleh elemen nomor 2540 sebesar  $2.24 \times 10^{-3}$  Ampere. Dari hasil distribusi yang didapat, diantara 50 elemen yang mengelilingi pipa terdapat 9 elemen yang mempunyai nilai arus dibawah kriteria minimal,  $3.3 \times 10^{-4}$  Ampere yaitu pada elemen yang ditunjukkan oleh warna abu-abu pada tabel 4.6. di atas, nilai arus terendah yaitu  $2.50 \times 10^{-5}$  Ampere terletak pada elemen 3419. Setelah dilakukan analisis terhadap 9 elemen tersebut, diketahui bahwa elemen-elemen tersebut berada pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  dari batas pipa. Hal ini berkorelasi dengan sistem yang diaplikasikan dimana pada rentang batas tersebut pipa dikondisikan terisolasi, sehingga nilai arus yang dibutuhkan untuk proteksi lebih sedikit. Gambar 4.3. berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  pada batas pipa pada potensial proteksi -950 mV



Gambar 4.3. Elemen di sekitar pipa yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -950 mV



Sebagai pembanding telah dilakukan pula simulasi desain sistem proteksi katodik anoda korban berdasarkan data yang telah diperoleh dari perusahaan yakni dilakukan pada potensial proteksi sebesar -1094 mV, -882 mV, dan -785 mV.

- a. Simulasi distribusi arus yang dengan nilai potensial proteksi -1094 mV

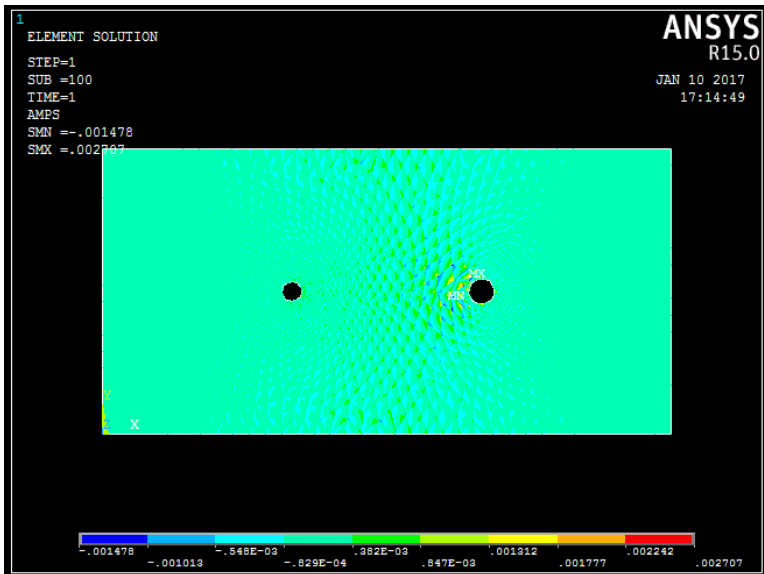
Simulasi pertama sebagai pembanding diambil dari data potensial proteksi katodik pada bulan Februari 2010, dimana potensial proteksi yang terbaca yaitu -1094 mV. Pembebanan elektrik yang diberikan pada kondisi batas dari model 2D untuk simulasi kedua dapat dilihat pada Tabel 4.7. berikut ini,

Tabel 4.7. Pembebanan Elektrik pada potensial proteksi - 1094 mV

Asumsi	Beban	Nilai	
Potensial proteksi = -1.094 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos = $E_{app} + E_{anoda} = -2.844 \text{ V}$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{app} = -1.094 \text{ V}$
	Arus	Selain pembebanan pada sisi anoda dan pipa yang terekspos = 0 A	Terinsulasi elektrik

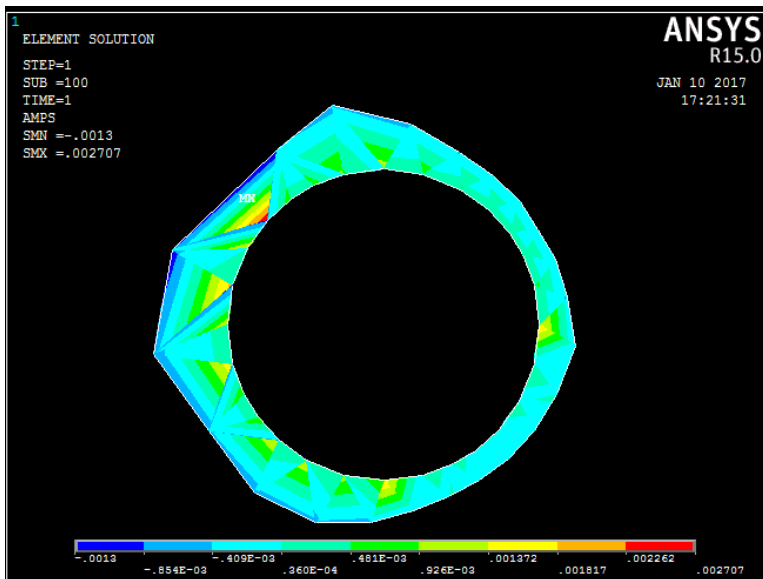
Dengan pembebanan elektrik seperti pada tabel 4.7. maka distribusi arus proteksi ketika potensial proteksinya sebesar -1094 mV dapat dilihat pada gambar 4.4. berikut ini,

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**



Gambar 4.4. Distribusi arus proteksi ketika potensial proteksi sebesar -1094 mV

Distribusi arus proteksi pada potensial proteksi sebesar -1094 mV dari sistem yang telah dibuat paling dominan berada pada range  $0.82 \times 10^{-4}$  Ampere sampai dengan  $3.82 \times 10^{-4}$  Ampere yang direpresentasikan dengan warna biru mendekati hijau. Sedangkan untuk lebih jelasnya distribusi arus di sekitar pipa dapat diketahui pada gambar 4.5. dan tabel 4.8. berikut ini,



Gambar 4.5. Distribusi arus di sekitar pipa saat potensial proteksi sebesar -1094 mV

Untuk mengetahui persebaran arus di sekitar pipa pada saat potensial proteksi sebesar -1094 mV dapat dilihat pada tabel 4.8. berikut ini,



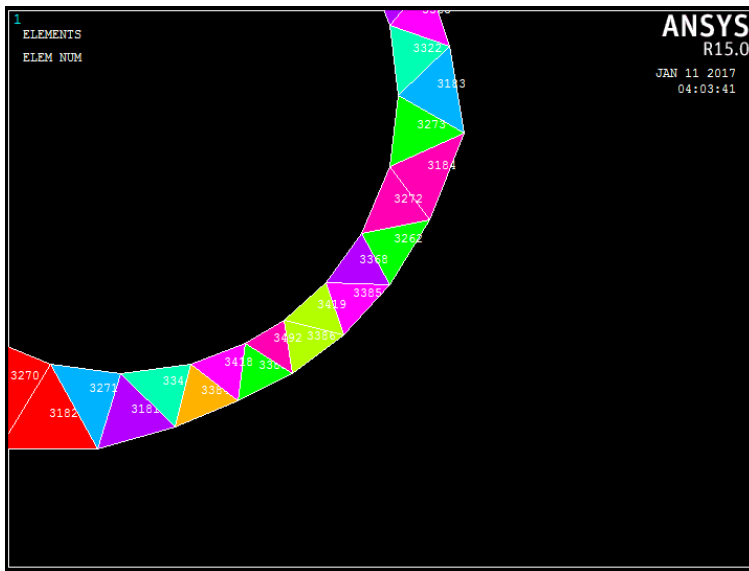


Tabel 4.8. Daftar distribusi arus di sekitar pipa pada saat potensial proteksi sebesar -1094 mV

Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen	Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A			
$2.88 \times 10^{-5}$	3419	$7.5 \times 10^{-4}$	3367
$8.29 \times 10^{-5}$	3386	$7.79 \times 10^{-4}$	3180
$9.57 \times 10^{-5}$	3492	$8.74 \times 10^{-4}$	3267
$9.81 \times 10^{-5}$	3385	$8.79 \times 10^{-4}$	3269
$1.21 \times 10^{-5}$	3368	$9.06 \times 10^{-4}$	3322
$1.91 \times 10^{-4}$	3383	$9.24 \times 10^{-4}$	3414
$2.30 \times 10^{-4}$	3262	$9.32 \times 10^{-4}$	3270
$2.36 \times 10^{-4}$	3418	$9.45 \times 10^{-4}$	3183
$2.75 \times 10^{-4}$	3272	$9.95 \times 10^{-4}$	3415
$4.17 \times 10^{-4}$	3489	$1.00 \times 10^{-3}$	3181
$4.64 \times 10^{-4}$	3384	$1.07 \times 10^{-3}$	3182
$4.88 \times 10^{-4}$	3460	$1.07 \times 10^{-3}$	3417
$5.01 \times 10^{-4}$	3490	$1.08 \times 10^{-3}$	3002
$5.06 \times 10^{-4}$	3413	$1.12 \times 10^{-3}$	3416
$5.06 \times 10^{-4}$	3461	$1.12 \times 10^{-3}$	3179
$5.28 \times 10^{-4}$	3382	$1.16 \times 10^{-3}$	3271
$5.46 \times 10^{-4}$	3365	$1.24 \times 10^{-3}$	2726
$5.72 \times 10^{-4}$	3491	$1.43 \times 10^{-3}$	2542
$5.75 \times 10^{-4}$	3412	$1.47 \times 10^{-3}$	3366
$5.79 \times 10^{-4}$	3184	$1.50 \times 10^{-3}$	3268
$5.96 \times 10^{-4}$	3261	$1.68 \times 10^{-3}$	2541
$6.07 \times 10^{-4}$	3344	$1.91 \times 10^{-3}$	2133
$6.43 \times 10^{-4}$	3363	$2.58 \times 10^{-3}$	2540
$6.67 \times 10^{-4}$	3264		
$6.77 \times 10^{-4}$	3265		
$6.33 \times 10^{-4}$	3273		
$7.51 \times 10^{-4}$	3266		



Pada simulasi potensial proteksi sebesar -1094, perbedaan distribusi arus di sekitar pipa ditunjukkan pada tabel 4.8 di atas, diketahui bahwa perbedaan nilai arus proteksi yang berada di sekitar pipa selain disebabkan karena posisi peletakkan anoda terhadap pipa juga dipengaruhi oleh besarnya potensial yang diberikan antara anoda dengan pipa, dimana hal ini menentukan *driving voltage* dari sebuah sistem proteksi katodik. Nilai arus keluaran anoda paling tinggi sebesar  $2.58 \times 10^{-3}$  Ampere, ditunjukkan oleh elemen 2540. Nilai ini lebih besar dari nilai yang dihasilkan pada potensial proteksi -950 mV, dikarenakan pada simulasi ini *driving voltage* yang diberikan lebih besar, karena selisih potensial antara anoda dan katoda lebih besar. Seperti pada simulasi sebelumnya, dari 50 elemen yang mengelilingi pipa terdapat 9 elemen yang merepresentasikan arus proteksi kurang dari kriteria minimal yang disyaratkan, yaitu pada elemen yang ditunjukkan dengan warna abu-abu pada tabel 4.8 di atas. Nilai arus terendah yaitu  $2.88 \times 10^{-5}$  Ampere terletak pada elemen 3419. Setelah dilakukan analisis terhadap 9 elemen tersebut, diketahui bahwa elemen-elemen tersebut berada pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$ . Hal ini berkorelasi dengan sistem yang diaplikasikan dimana pada rentang batas tersebut pipa dikondisikan terisolasi, sehingga nilai arus yang dibutuhkan untuk proteksi lebih sedikit. Gambar 4.6. berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360$  pada batas pipa saat potensial proteksi -1094 mV,



Gambar 4.6. Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -1094 mV

- b. Simulasi distribusi arus dengan nilai potensial proteksi - 882 mV

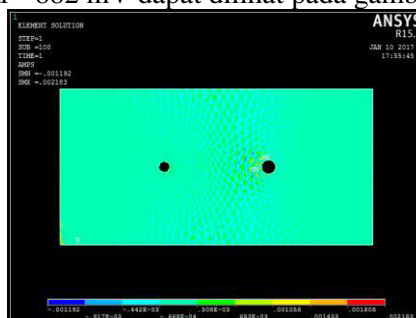
Simulasi kedua diambil dari data potensial proteksi katodik pada bulan Januari 2010, dimana potensial proteksi yang terbaca yaitu -882 mV. Pembebanan elektrik yang diberikan pada kondisi batas dari model 2D untuk simulasi kedua dapat dilihat pada Tabel 4.9. berikut ini,



Tabel 4.9. Pembebanan Elektrik pada simulasi dengan nilai potensial proteksi -882 mV

Kondisi batas	Beban	Nilai	
Potensial proteksi = -0.882 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos = $E_{app} + E_{anoda} = -2.632 \text{ V}$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{app} = -0.882 \text{ V}$
	Arus	Selain pembebanan pada anoda dan pipa yang terekspos = 0 A	Terinsulasi elektrik

Distribusi arus pada sistem untuk potensial proteksi sebesar - 882 mV dapat dilihat pada gambar 4.7. berikut,

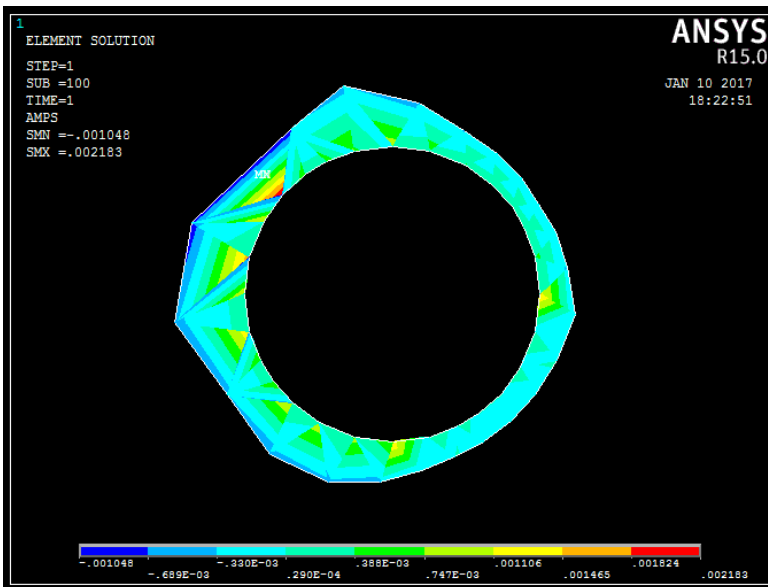


Gambar 4.7. Distribusi arus hasil simulasi SACP pada potensial proteksi -882 mV

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Pada gambar 4.7. di atas dapat dilihat distribusi arus di sekitar pipa ketika potensial proteksinya sebesar -882 mV adalah didominasi oleh nilai arus dengan rentang nilai antara  $0.64 \times 10^{-4}$  A sampai dengan  $3.08 \times 10^{-4}$  A, yang direpresentasikan oleh warna biru kehijauan. Untuk lebih jelasnya distribusi arus di sekitar pipa dapat dilihat pada gambar 4.8 dan tabel 4.10 berikut ini,



Gambar 4.8. Distribusi arus di sekitar pipa hasil simulasi pada potensial proteksi -882 mV

Gradient perbedaan nilai arus proteksi di sekitar pipa dapat dilihat pada tabel 4.10 berikut ini,



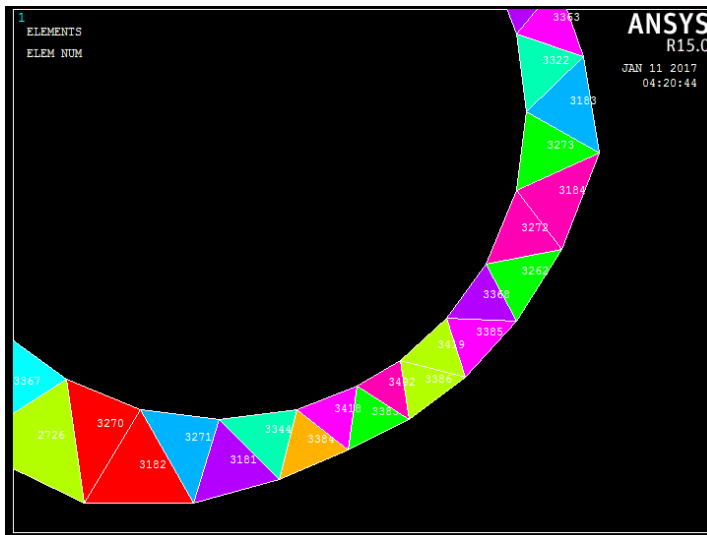
Tabel 4.10. Distribusi arus di sekitar pipa hasil simulasi pada potensial proteksi -882 mV

Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen	Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A			
$2.32 \times 10^{-5}$	3419	$6.40 \times 10^{-4}$	3367
$6.69 \times 10^{-5}$	3386	$6.55 \times 10^{-4}$	3180
$7.72 \times 10^{-5}$	3492	$6.43 \times 10^{-4}$	3267
$8.01 \times 10^{-5}$	3385	$7.49 \times 10^{-4}$	3269
$9.74 \times 10^{-5}$	3368	$7.67 \times 10^{-4}$	3322
$1.54 \times 10^{-5}$	3383	$7.62 \times 10^{-4}$	3414
$1.86 \times 10^{-5}$	3262	$8.02 \times 10^{-4}$	3270
$1.90 \times 10^{-5}$	3418	$8.07 \times 10^{-4}$	3183
$2.22 \times 10^{-5}$	3272	$8.6 \times 10^{-4}$	3415
$3.37 \times 10^{-4}$	3489	$8.64 \times 10^{-4}$	3181
$3.74 \times 10^{-4}$	3384	$8.68 \times 10^{-4}$	3182
$3.93 \times 10^{-4}$	3460	$9.02 \times 10^{-4}$	3417
$4.04 \times 10^{-4}$	3490	$9.03 \times 10^{-4}$	3002
$4.08 \times 10^{-4}$	3413	$9.33 \times 10^{-4}$	3416
$4.08 \times 10^{-4}$	3461	$1.00 \times 10^{-3}$	3179
$4.26 \times 10^{-4}$	3382	$1.01 \times 10^{-3}$	3271
$4.40 \times 10^{-4}$	3365	$1.05 \times 10^{-3}$	2726
$4.61 \times 10^{-4}$	3491	$1.21 \times 10^{-3}$	2542
$4.64 \times 10^{-4}$	3412	$1.27 \times 10^{-3}$	3366
$4.66 \times 10^{-4}$	3184	$1.29 \times 10^{-3}$	3268
$4.80 \times 10^{-4}$	3261	$1.45 \times 10^{-3}$	2541
$4.89 \times 10^{-4}$	3344	$1.47 \times 10^{-3}$	2133
$5.19 \times 10^{-4}$	3363	$2.08 \times 10^{-3}$	2540
$5.46 \times 10^{-4}$	3264		
$5.88 \times 10^{-4}$	3265		
$6.05 \times 10^{-4}$	3273		
$6.06 \times 10^{-4}$	3266		

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Tabel 4.10 menunjukkan distribusi arus di sekitar pipa pada potensial proteksi -882 mV yang direpresentasikan oleh beberapa elemen. Nilai arus proteksi tertinggi di sekitar pipa terletak pada elemen 2540 dengan nilai arus sebesar  $2.08 \times 10^{-3}$  Ampere. Area ini merupakan area yang berada pada posisi paling dekat dengan anoda yaitu pada *range* posisi  $90^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$ , yang merepresentasikan kondisi tidak *tercoating*. Perbedaan arus proteksi yang terjadi disebabkan karena posisi peletakan anoda terhadap pipa, jarak antar anoda dan besar perbedaan potensial antar pipa dan anoda serta resistansi dari anoda mempengaruhi keluaran arus dari anoda. Seperti pada simulasi sebelumnya, dari 50 elemen yang mengelilingi pipa terdapat 9 elemen yang merepresentasikan arus proteksi kurang dari kriteria minimal yang disyaratkan, yaitu pada elemen yang ditunjukkan dengan warna abu-abu pada tabel 4.10 di atas. Nilai arus terendah yaitu  $2.32 \times 10^{-5}$  Ampere terletak pada elemen 3419. Setelah dilakukan analisis terhadap 9 elemen tersebut, diketahui bahwa elemen-elemen tersebut berada pada posisi  $270^{\circ} < \theta < 360^{\circ}$ . Hal ini berkorelasi dengan sistem yang diaplikasikan dimana pada rentang batas tersebut pipa dikondisikan terisolasi, sehingga nilai arus yang dibutuhkan untuk proteksi lebih sedikit. Gambar 4.9. berikut menunjukkan posisi  $270^{\circ} < \theta < 360^{\circ}$  pada batas pipa saat potensial proteksi -882 mV,



Gambar 4.9. Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -882 mV

- c. Simulasi distribusi arus dengan nilai potensial proteksi -785 mV

Simulasi pembanding yang ketiga diambil dari data potensial proteksi katodik pada bulan agustus 2010, dimana potensial proteksi yang terbaca yaitu -785 mV. Pembebanan elektrik pada simulasi ini dapat dilihat pada Tabel berikut 4.11 berikut ini,

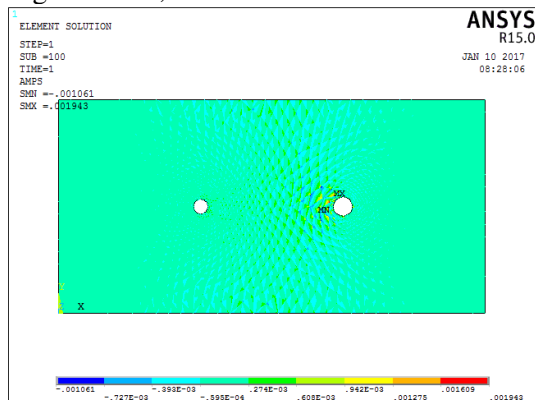




Tabel 4.11. Pembebanan Elektrik pada simulasi dengan nilai potensial proteksi -785 mV (JOB PPEJ East Java)

Kondisi batas	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -0.785 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos ke lingkungan = $E_{app} + E_{anoda} = -2.535$ V	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{app} = -0.785$ V
	Arus	Selain pembebanan pada anoda dan pipa yang terekspos = 0 A	Terinsulasi elektrik

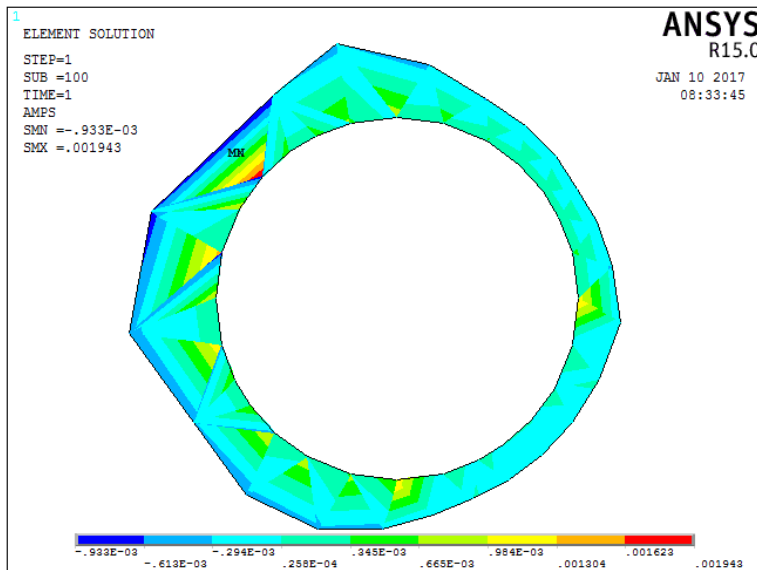
Distribusi arus dari sistem hasil simulasi untuk potensial proteksi sebesar -785 mV dapat dilihat pada gambar 4.10 sebagai berikut,



Gambar 4.10. Distribusi arus saat potensial proteksi sebesar -785 mV



Pada gambar 4.10. di atas dapat dilihat distribusi arus di sekitar pipa ketika potensial proteksinya sebesar -785 mV adalah didominasi oleh nilai arus dengan rentang nilai antara  $0.593 \times 10^{-4}$  Ampere sampai dengan  $2.74 \times 10^{-4}$  Ampere, yang direpresentasikan oleh warna biru kehijauan. Untuk lebih jelasnya distribusi arus di sekitar pipa dapat dilihat pada gambar 4.11 dan tabel 4.12 berikut ini,



Gambar 4.11 Distribusi arus proteksi di sekitar pipa ketika potensial proteksinya -785 mV  
Gradien perbedaan nilai arus di sekeliling pipa dapat dilihat berdasarkan Tabel 4.12 berikut ini,

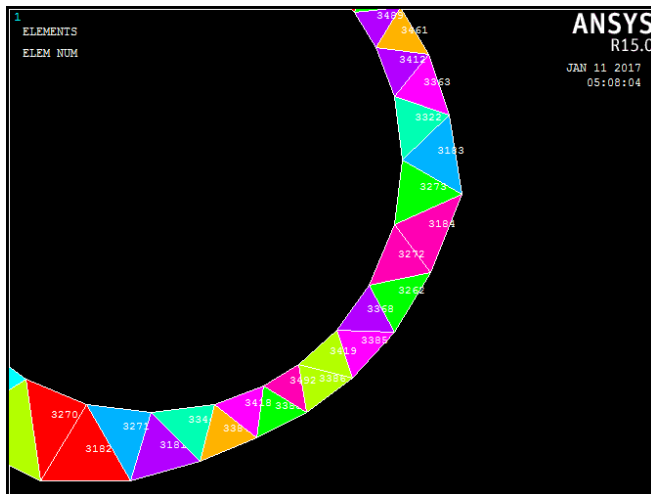


Tabel 4.12 Daftar nilai distribusi arus proteksi di sekitar pipa dengan potensial proteksinya -785 mV

Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen	Nilai arus (Ampere)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A			
$2.07 \times 10^{-5}$	3419	$5.40 \times 10^{-4}$	3367
$5.95 \times 10^{-5}$	3386	$5.59 \times 10^{-4}$	3180
$6.87 \times 10^{-5}$	3492	$6.27 \times 10^{-4}$	3267
$7.13 \times 10^{-5}$	3385	$6.31 \times 10^{-4}$	3269
$8.67 \times 10^{-5}$	3368	$6.50 \times 10^{-4}$	3322
$1.37 \times 10^{-4}$	3383	$6.63 \times 10^{-4}$	3414
$1.65 \times 10^{-4}$	3262	$6.68 \times 10^{-4}$	3270
$1.69 \times 10^{-4}$	3418	$6.78 \times 10^{-4}$	3183
$1.97 \times 10^{-4}$	3272	$7.14 \times 10^{-4}$	3415
$3.00 \times 10^{-4}$	3489	$7.18 \times 10^{-4}$	3181
$3.33 \times 10^{-4}$	3384	$7.66 \times 10^{-4}$	3182
$3.50 \times 10^{-4}$	3460	$7.69 \times 10^{-4}$	3417
$3.60 \times 10^{-4}$	3490	$7.73 \times 10^{-4}$	3002
$3.63 \times 10^{-4}$	3413	$8.03 \times 10^{-4}$	3416
$3.63 \times 10^{-4}$	3461	$8.04 \times 10^{-4}$	3179
$3.79 \times 10^{-4}$	3382	$8.31 \times 10^{-4}$	3271
$3.92 \times 10^{-4}$	3365	$8.51 \times 10^{-4}$	2541
$4.10 \times 10^{-4}$	3491	$8.91 \times 10^{-4}$	2726
$4.13 \times 10^{-4}$	3412	$1.03 \times 10^{-4}$	2542
$4.15 \times 10^{-4}$	3184	$1.06 \times 10^{-3}$	3366
$4.28 \times 10^{-4}$	3261	$1.07 \times 10^{-3}$	3268
$4.36 \times 10^{-4}$	3344	$1.37 \times 10^{-3}$	2133
$4.62 \times 10^{-4}$	3363	$1.85 \times 10^{-3}$	2540
$4.79 \times 10^{-4}$	3264		
$4.86 \times 10^{-4}$	3265		
$5.23 \times 10^{-4}$	3273		
$5.39 \times 10^{-4}$	3266		



Tabel 4.12. di atas menunjukkan distribusi arus proteksi pada potensial -785 mV, nilai arus proteksi tertinggi yaitu sebesar  $1.85 \times 10^{-3}$  Ampere yang terletak pada elemen nomor 2540. Sedangkan hasil analisa nilai distribusi arus di sekitar pipa yang berada di bawah batas kriteria arus minimal menunjukkan adanya perbedaan dengan hasil simulasi sebelumnya ketika potensial proteksi sebesar -950 mV, -1094 mV, -882 mV. Pada simulasi ini dari 50 elemen di sekitar pipa yang merepresentasikan arus proteksi di sekitar pipa terdapat 10 elemen yang menunjukkan nilai arus dibawah batas proteksi minimal. Pada tabel 4.12 di atas ditunjukkan oleh tabel dengan warna abu-abu. Setelah dilakukan analisis didapatkan hasil bahwa elemen dengan nomor 3419, 3386, 3492, 3385, 3368, 3383, 3262, 3418, 3272 merupakan elemen yang terletak pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  pada batas pipa dimana area ini merupakan area yang terisolasi sehingga kebutuhan arus yang dibutuhkan pun akan lebih kecil dibandingkan kebutuhan arus minimal proteksi. Sedangkan elemen 3489 dengan nilai arus  $3.00 \times 10^{-4}$  Ampere merupakan elemen yang ada dalam posisi  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , hal ini membuktikan bahwa pada potensial -785 mV belum cukup untuk dapat menyuplai arus proteksi yang dapat memproteksi keseluruhan pipa. Hal ini sesuai dengan standar NACE SP 0169 bahwa potensial proteksi harus berada pada range -850 sampai dengan -1050 mV. Gambar berikut menunjukkan nomor elemen yang berada pada area  $270^\circ < \theta < 360^\circ$ . Gambar 4.12. berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  (daerah terisolasi) pada potensial proteksi -785 mV



Gambar 4.12 Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -785 mV

Setelah dilakukan empat simulasi sistem proteksi katodik, diketahui bahwa tiga simulasi pada potensial proteksi -950 mV, -1094 mV, dan -882 mV menunjukkan bahwa pada area batas pipa yang diatur terinsulasi listrik memiliki nilai arus yang kurang dari kriteria proteksi hasil perhitungan, hal ini wajar karena kebutuhan arus pada pipa dengan *coating* akan berkurang dan akan bertambah seiring dengan mengikisnya bahan *coating*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar nilai potensial proteksi yang diaplikasikan maka semakin besar arus yang dapat dikeluarkan oleh anoda dalam memproteksi struktur pipa. Hal ini sesuai dengan hukum Ohm, dimana nilai arus sebanding dengan potensial dalam kondisi resistansi yang sama. Selain itu, besar kecilnya keluaran arus dari anoda yang digunakan untuk memproteksi pipa juga bergantung pada besar kecilnya selisih antara potensial katoda dan anoda. Semakin besar selisih antara potensial katoda dan anoda maka *driving voltage* akan semakin besar dan keluaran arus juga akan lebih besar.



Elemen-elemen dengan nomor 3419, 3386, 3492, 3385, 3368, 3383, 3262, 3418, 3272 pada setiap simulasi dari berbagai potensial proteksi yang diaplikasikan merupakan elemen dengan nilai arus dibawah kriteria minimal. Elemen-elemen tersebut berada pada posisi  $270^{\circ} \leq \theta \leq 360^{\circ}$ . Pada setiap simulasi nilai arus terbesar yang diterima oleh pipa adalah pada posisi elemen 2540. Hal ini menunjukkan kewajaran dimana pada elemen tersebut terletak pada posisi yang berhadapan langsung dengan anoda  $90^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$ , posisi ini termasuk dari daerah yang membutuhkan arus proteksi lebih tinggi karena kondisi yang tidak tercoating. Simulasi yang dilakukan membuktikan bahwa sistem proteksi katodik bekerja pada daerah pipa yang mengalami kerusakan coating yaitu pada posisi  $0^{\circ} \leq \theta \leq 270^{\circ}$ .

Sedangkan pada potensial proteksi -882 mV menunjukkan hasil bahwa pada kondisi ini pipa tidak terproteksi karena dari hasil simulasi didapat bahwa pada area yang tidak tercoating,  $0^{\circ} \leq \theta \leq 270^{\circ}$  terdapat elemen yang menunjukkan nilai arus dibawah kriteria, yakni pada elemen nomor 3489 dengan nilai arus sebesar  $3.00 \times 10^{-4}$  Ampere.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Dengan dilakukannya rancang ulang desain proteksi katodik anoda korban pada *water injection pipeline* dari CPA-Sawah – Pad C didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Evaluasi desain yang telah dilakukan menunjukkan bahwa perhitungan desain hasil evaluasi dengan yang diterapkan oleh perusahaan masih relevan, tetapi perbedaan kondisi lingkungan dalam hal ini resistivitas tanah menyebabkan desain SACP perlu dioptimasi.
2. Hasil rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban menyatakan bahwa jumlah anoda yang digunakan untuk memproteksi *water injection pipeline* adalah 13 buah, dengan konfigurasi sebagai berikut :
  - CPA : terdiri dari 4 buah *high magnesium anode* (17 lb) dengan jarak pemasangan tiap anoda adalah 125.5 m, dan arus keluaran pada setiap anoda sebesar 0.0594 Ampere
  - Sawah : terdiri dari 7 buah *high magnesium anode* (32 lb) dengan jarak pemasangan antar anoda adalah 257.143 m, dan arus keluaran pada setiap anoda adalah 0.619 Ampere
  - Pad C : terdiri dari 2 buah *high magnesium anode* (32 lb) dengan jarak pemasangan antar anoda adalah 151.8 m dan arus keluaran dari setiap anoda sebesar 0.138 Ampere
3. Hasil simulasi 2D di area pad C menunjukkan bahwa desain rancang ulang dapat diterima dengan dengan potensial proteksi berkisaran antara -850 sampai dengan -1050 mV sesuai dengan standar NACE SP 0169 dengan keluaran arus minimal sebesar  $3.33 \times 10^{-4}$  Ampere



## **5.2. Saran**

Beberapa hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan performa simulasi (mengoptimalkan model) antara lain :

1. Sebaiknya ada data lingkungan, teknis maupun analisis dari desain proteksi katodik sebelumnya agar dapat dijadikan acuan dalam perancangan desain
2. Membuat model 3D agar distribusi pada sepanjang pipa dapat jelas terlihat
3. Menggunakan software yang sesuai untuk mekanisme elektrokimia



## DAFTAR PUSTAKA

- . 1997. IPS-E-TP-270 : *Engineering Standard for Protective Coatings for Buried and Submerged Steel Structure*, s.l.: Iranian Ministry of Petroleum.
- . 2010. DNV-RP-B401: *Cathodic Protection Design*. (Det Norske Veritas).
- Ahmad, Z., 2006. *Principles Of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Burlington, MA 01803, USA: Elsevier.
- Baboian, R., 2002. *NACE Corrosion Engineer's Reference Book*. 3rd ed. Houston: NACE International.
- Baynham, A. Adey R., John, 2016. *Design and Optimisation of Cathodic Protection Systems Using Computer Simulation*. Research Gate.
- Brown, Limay, Bursten, Musrphy. 2012. *Chemistry, The Central Science*. In: United State of America: Pearson.
- Commerce, U. 1962-1971. *Uderground Corrosion of Steel Piling*. NBS paper.
- Corrpro Companies Europe, 2016. *Corrpro*. [Online].
- Deconinck and F. Brichau. 1993. *A Numerical Model for Cathodic Protection of Buried Pipes*. Corrosion Science.
- Didas, J., 2014. *Fundamental of Pipeline Protective Coating*, West Virginia: Appalachian Underground Short Course.
- Fontana, Mars G.1997.*corrosion engineer*.

- Institute, A. c., 1999. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*. America: The United States of America Legally Binding Document.
- Iswahyudi, 2008. *Desain Sistem Proteksi Katodik dengan Anoda Tumbal Sebagai Pengendali Laju Korosi Baja pada Jaringan Pipa Pertamina UPMS V. Tiugas Akhir*, s.l.: Institut Teknologi Sepuluh Nopemner.
- Jianhua Wu., Xing, Shaohua, Liang, X., Lu lu, Yan, Y. 2010. *The Influence of Electrode Position and Output Current on the Corrosion Related Electro-Magnetic Field of Ship*. Advances in Engineering Software .
- James B. Bushman, P., 2015. *Galvanic Anode Cathodic Protection System Design*. Medina, Ohio USA, Bushman and Associate, Inc.
- J.J. McManus, Pennie, W.L., dan Davies, A., 1952. *Coal-Tar Pitch Base for Enamels*, United States America: Allied Chemical Corporation.
- Kopperson, D., Horne, S., Kohn, George., Romansky, D., Chan, C., 1998. *Injection acid gas with water creater new disposal*. PanCanadian Petroloum Ltd.
- M. Gadala, I., A. Wahab, M., Alfantazi, A., 2015. *Numerical Simulations of Soil Physicochemistry and Aeration influences on the External Corrosion and Cathodic Protection Design of Buried Pipeline Steels*. Materials and Design.
- Muharemovic, A., Zildo, H., Letic, E., 2008. *Modelling of Protective Potential Distribution in a Cathodic Protection System using a Coupled BEM/FEM method*. WIT Press.

- Marcassoli, P., 2015. *FEM Modelling of Subsea Pipeline under Cathodic Protection*. Materials and Corrosion.
- Peabody, A., 1967. *Control of Pipeline Corrosion*. 2nd ed. United States of America: NACE Press.
- Robertson, Eugene C., 1998. *Thermal Properties of Rocks*. United States Department Of The Interior: Geological Survey
- S.Fonna, 2012. *Infinite Boundary Element Formulation for the Analysis of CP System for Submersible Pump*. Scientific.net.
- S.H.Xing, Y.Li, H.Q., Song, Y.G., Yan, M.X. 2015. *Optimization the Quantity, Locations, and Output Currents of Anodes to Improve Cathodic Protection Effect of Semi-Submersible Crane Vessel*. Ocean engineering.
- Srinivisan, 2003. *Current Protection Design Method, Current Mapping and System*. US Patent.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban Area CPA dengan anoda baru

Komponen	Notasi	Angka	Satuan
Luas permukaan yang diproteksi ( $A_c$ )			
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Total panjang pipa	L	502.2	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$A_c = \pi \times OD \times L$	424.19	m <sup>2</sup>
Total arus yang dibutuhkan (I)			
Luas permukaan yang diproteksi	$A_c$	424.19	m <sup>2</sup>
Rapat arus Pipa dengan Coating	$I_c$	0.0005	A/m <sup>2</sup>
<i>Coating breakdown</i>	$f_c$	0.75	
Hasil	$I = (A_c \times I_c \times f_c) + 5\%I$	0.167	A
Kebutuhan berat total anoda selama waktu desain (M)			
Arus total	I	0.167	A
Waktu proteksi	t	20	tahun
Kapasitas anoda	C	1230	Ah/kg
Faktor utilitas	U	0.85	
1 tahun		8760	jam

Hasil	$M = \frac{It8760}{CU}$	28.0033	kg
Jumlah anoda (n)			
Berat total anoda selama waktu desain	M	28.0033	kg
Berat sebuah anoda	Ma	14.515	kg
hasil	$n = \frac{M}{Ma}$	2	buah
Jarak pemasangan antar anoda (Sa)			
Panjang total pipa	L	502.2	m
Jumlah anoda	n	2	buah
Hasil	$Sa = \frac{L}{n}$	251.1	m
Keperluan arus proteksi berdasarkan jarak antar anoda (Is)			
Phi	$\pi$	3.14	
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Jarak pemasangan antar anoda	Sa	251.1	m
Rapat arus pipa dengan coating	Ic	0.0005	A/m <sup>2</sup>
	fc	0.75	
Hasil	$Is = \pi \times OD \times Sa \times Ic \times fc$	0.07958	A

Resistansi anoda secara horizontal (Rh)			
Tahanan jenis tanah	$\rho$	29.905	Ohm-m
Panjang anoda	$l$	0.711	m
Diameter anoda	$d$	0.203	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$R_h = \frac{\rho / (2\pi l)}{\left(\ln\left(\frac{4l}{d}\right) - 1\right)}$	10.6097	Ohm
Kapabilitas keluaran arus anoda (Ia)			
<i>Driving voltage</i>	$\Delta V$	0.6	Volt
Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal	$R_h$	10.6097	Ohm
Hasil	$I_a = \frac{\Delta V}{R_h}$	0.0565	A
Keterangan	$I_s \leq I_a$	0.0795 > 0.0565 (proteksi tidak terpenuhi)	

## 2. Perhitungan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban Area CPA dengan anoda Baru

Komponen	Notasi	Angka	Satuan
Luas permukaan yang diproteksi ( $A_c$ )			
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Total panjang pipa	L	502.2	m

Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$A_c = \pi \times OD \times L$	424.18825	$m^2$
Total arus yang dibutuhkan (I)			
Luas permukaan yang diproteksi	$A_c$	424.1883	$m^2$
Rapat arus Pipa dengan Coating	$I_c$	0.0005	$A/m^2$
<i>Coating breakdown</i>	$f_c$	0.75	
Hasil	$I = (A_c \times I_c \times f_c) + 5\%I$	0.167	A
Kebutuhan berat total anoda selama waktu desain (M)			
Arus total	$I$	0.167	A
Waktu proteksi	$t$	20	tahun
Kapasitas anoda	$C$	1230	Ah/kg
Faktor utilitas	$U$	0.85	
1 tahun		8760	jam
Hasil	$M = \frac{It8760}{CU}$	28.0033	kg
Jumlah anoda (n)			
Berat total anoda selama waktu desain	$M$	28.0033	kg
Berat sebuah anoda	$M_a$	7.7	kg
Hasil	$n = \frac{M}{M_a}$	4	buah
Jarak pemasangan antar anoda (Sa)			
panjang total pipa	$L$	502.2	m



Jumlah anoda	n	4	buah
Hasil	$S_a = \frac{L}{n}$	125.55	m
Keperluan arus proteksi berdasarkan jarak antar anoda (Is)			
Phi	$\pi$	3.14	
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Jarak pemasangan antar anoda	Sa	125.55	m
Rapat arus pipa dengan coating	Ic	0.0005	A/ m <sup>2</sup>
<i>Coating breakdown</i>	fc	0.75	
Hasil	$I_s = \pi \times D \times S_a \times I_c \times f_c$	0.039	A
Resistansi anoda secara horizontal (Rh)			
Tahanan jenis tanah	$\rho$	29.905	Ohm-m
Panjang anoda	l	0.864	m
Diameter anoda	d	0.191	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$R_h = \frac{\rho / (2\pi l)}{(\ln \left( \frac{4l}{d} \right) - 1)}$	10.093	Ohm
Kapasitas keluaran arus anoda (Ia)			
<i>Driving voltage</i>	$\Delta V$	0.6	Volt
Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal	Rh	10.093	Ohm

Hasil	$I_a = \frac{\Delta V}{R_h}$	0.05944	A
Keterangan	$I_s \leq I_a$	0.039 < 0.05944 (proteksi terpenuhi)	

### 3. Perhitungan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban Area Sawah

Komponen	Notasi	Angka	Satuan
Luas permukaan yang diproteksi ( $A_c$ )			
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Total panjang pipa	L	1800	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$A_c = \pi \times OD \times L$	1521.158	m <sup>2</sup>
Total arus yang dibutuhkan (I)			
Luas permukaan yang diproteksi	$A_c$	1521.158	m <sup>2</sup>
Rapat arus Pipa dengan Coating	$I_c$	0.0005	A/ m <sup>2</sup>
<i>Coating breakdown</i>	$f_c$	0.75	
Hasil	$I = (SA \times I_c \times f_c) + 5\%I$	0.5989	A
Kebutuhan berat total anoda selama waktu desain (M)			
Arus total	I	0.5989	A
Waktu proteksi	t	20	tahun
Kapasitas anoda	C	1230	Ah/kg
Faktor utilitas	U	0.85	
1 tahun		8760	jam

Hasil	$M = \frac{It8760}{CU}$	100.3702	kg
Jumlah anoda (n)			
Berat total anoda selama waktu desain	M	100.3702	kg
Berat sebuah anoda	Ma	14.515	kg
Hasil	$n = \frac{M}{Ma}$	7	Buah
Jarak pemasangan antar anoda (Sa)			
Panjang total pipa	L	1800	m
Jumlah anoda	n	7	Buah
Hasil	$Sa = \frac{L}{n}$	257.1429	m
Keperluan arus proteksi berdasarkan jarak antar anoda (Is)			
Phi	$\pi$	3.14	
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Jarak pemasangan antar anoda	Sa	257.1479	m
Rapat arus pipa dengan coating	Ic	0.0005	A/ m <sup>2</sup>
Coating breakdown	fc	0.75	
Hasil	$Is = \pi \times OD \times Sa \times Ic \times fc$	0.0815	A
Resistansi anoda secara horizontal (Rh)			
Tahanan jenis tanah	$\rho$	2.6389	Ohm-m

Panjang anoda	$l$	0.711	m
Diameter anoda	$d$	0.203	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$R_h = \frac{\rho / (2\pi l)}{(\ln \left( \frac{4l}{d} \right) - 1)}$	0.9685	Ohm
Kapasitas keluaran arus anoda ( $I_a$ )			
Driving voltage	$\Delta V$	0.6	Volt
Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal	$R_h$	0.9685	Ohm
Hasil	$I = \frac{\Delta V}{R_h}$	0.619	A
Keterangan	$I_s \leq I_a$	0.0815 < 0.619 (Kondisi proteksi terpenuhi)	

#### 4. Perhitungan Desain Proteksi Katodik Anoda Korban Area Pad C

Komponen	Notasi	Angka	Satuan
Luas permukaan yang diproteksi ( $A_c$ )			
Diameter luar pipa	OD	0.269	m
Total Panjang pipa	L	303.6	m
Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$A_c = \pi \times OD \times L$	256.438776	m <sup>2</sup>

Total arus yang dibutuhkan (I)			
Luas permukaan yang diproteksi	Ac	256.43878	m <sup>2</sup>
Rapat arus Pipa dengan Coating	Ic	0.0005	A/ m <sup>2</sup>
<i>Coating breakdown</i>	fc	0.75	
Hasil	$I = (Ac \times Ic \times fc) + 5\%I$	0.101	A
Kebutuhan berat total anoda selama waktu desain (M)			
Arus total	I	0.101	A
Waktu proteksi	t	20	tahun
Kapasitas anoda	C	1230	Ah/kg
Faktor utilitas	U	0.85	
1 tahun		8760	jam
Hasil	$M = \frac{It8760}{CU}$	16.929	kg
Jumlah anoda (n)			
Berat total anoda selama waktu desain	M	16.929	kg
Berat sebuah anoda		14.515	kg

Hasil	$n = \frac{M}{Ma}$	2	buah
Jarak pemasangan antar anoda (Sa)			
Panjang total pipa	L	303.6	m
Jumlah anoda	n	2	Buah
Hasil	$Sa = \frac{L}{n}$	151.8	m
Keperluan arus proteksi berdasarkan jarak antar anoda (Is)			
Phi	$\pi$	3.14	
Diameter luar pipa	D	0.269	m
Jarak pemasangan antar anoda	Sa	151.8	m
Rapat arus pipa dengan coating	Ic	0.0005	A/m <sup>2</sup>
<i>Coating breakdown</i>	fc	0.75	
Hasil	$Is = \pi \times D \times Sa \times Ic \times fc$	0.048	A
Resistansi anoda secara horizontal (Rh)			
Tahanan jenis tanah	$\rho$	11.8	Ohm-m
Panjang anoda	l	0.711	m
Diameter anoda	d	0.203	m

Phi	$\pi$	3.14	
Hasil	$\frac{\rho/(2\pi l)}{(\ln\left(\frac{4l}{d}\right) - 1)}$ Rh =	4.333	Ohm
Kapasitas keluaran arus anoda (Ia)			
<i>Driving voltage</i>	$\Delta V$	0.6	Volt
Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal	Rh	4.196	Ohm
Hasil	$I_a = \frac{\Delta V}{R_h}$	0.138	A
Kesimpulan	$I_s \leq I_a$	0.048 < 0.138 (Kondisi proteksi terpenuhi)	

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kabupaten Mojokerto pada tanggal 21 Agustus 1995. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Mustadi dan Khasanah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Ngastemi 2, SMPN 1 Bangsal, dan SMAN 1 Sooko. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan, dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff departemen kesejahteraan mahasiswa HMMT FTI ITS dan Ketua muslimah Ash-Haabul Kahfi 2015/2016. Selain itu penulis sempat aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Kimia Material.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di JOB Pertamina – Petrochina East Java Tuban Plant pada bulan Agustus 2016. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait “Perancangan Desain Proteksi katodik menggunakan arus paksa”.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan berjudul “Optimasi Desain dan Simulasi Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban pada *Water Injection Pipeline* Pertamina-Petrochina East Java Tuban Plant”.

*Email: mustikaerlinda@gmail.com*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*